

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Selvicultura de apoyo a la restauración pasiva de masas de *Pinus pinaster* regeneradas tras incendios forestales

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

Univ. de Alcalá, Univ. Complutense de Madrid, Univ. Politécnica de Madrid y Univ. Rey Juan Carlos

Curso 2019-2020

Presentado por:

DESIRÉ DELGADO HERNÁNDEZ

Director:

JAVIER MADRIGAL OLMO (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria)

Tutor académico:

JOSÉ M. REY BENAYAS (Universidad de Alcalá)

En Madrid, a 30 de octubre de 2020



Índice

Índice de tablas	3
Índice de figuras	3
Preámbulo	7
Resumen	8
Abstract	9
1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 Marco conceptual	10
1.1.1 Incendios forestales.....	10
1.2 Fundamentos teóricos	12
1.2.1 Vegetación adaptada al fuego en ecosistemas mediterráneos	12
1.2.2 Pinus pinaster	13
1.2.3 Selvicultura y restauración ecológica	15
1.2.4 Tratamientos selvícolas: clareos	16
1.2.5 Variables dasométricas	18
1.3 Antecedentes y estado actual	18
2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS	20
3 MATERIAL Y MÉTODOS.....	21
3.1 Área de estudio	21
3.2 Especie y características de la masa	21
3.3 Diseño experimental.....	22
3.4 Variables muestreadas.....	23
3.5 Tratamiento estadístico	25
4 RESULTADOS	26
4.1 Evolución temporal de variables dasométricas	27
4.1.1 Alturas.....	28
4.1.2 Diámetros del fuste.....	29
4.1.3 Diámetro de copa	33
4.1.4 Espesor de corteza.....	33
4.2 Índices selvícolas	34

4.2.1	Razón de copa	34
4.2.2	Coeficiente de esbeltez	35
4.3	Biomasa.....	36
4.4	Fructificación	37
5	DISCUSIÓN	41
6	CONCLUSIONES	43
7	AGRADECIMIENTOS	44
8	BIBLIOGRAFÍA	45
9	ANEXOS	49

Índice de tablas

Tabla 1. Coordenadas UTM de las parcelas de Fraguas (Cogolludo-Guadalajara).....	22
Tabla 2. Tratamientos aplicados.	23
Tabla 3. Número de identificación de cada parcela para cada réplica de cada tratamiento.	23
Tabla 4. Presencia de datos de cada variable en cada año de medición.	24
Tabla 5. Valores medios de las variables dasométricas en función del tratamiento aplicado (T, A, B) y el año de medición. La ausencia de datos indica la falta de toma de muestras durante ese año y tratamiento.....	26
Tabla 6. Resultados del análisis estadístico (ANOVA).	27
Tabla 7. Modelos Lineales Mixtos utilizados para el tratamiento estadístico de las variables dasométricas.	50
Tabla 8. Promedio de piñas en cada parcela (en cada réplica de los tratamientos aplicados). La primera columna hace referencia a la ubicación de las piñas en el fuste (F) o en las ramas (R). Datos del año 2018.	54
Tabla 9. Promedio y máximo de piñas según el tratamiento aplicado (T, A, B). Datos del año 2018.....	54
Tabla 10. Test de normalidad de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de los residuos.	55
Tabla 11. Test de Levene de homogeneidad de varianza.	55

Índice de figuras

Figura 1. Mapas de la probabilidad de incendios obtenidos mediante modelos regresión lineal (imagen superior) y modelos “Random Forest” (imagen inferior). De color rojo se muestra una mayor probabilidad de incendios, mientras que la probabilidad más baja está representada en color verde. Fuente: Oliveira et al., 2012.	12
Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio en España (izquierda) y en la provincia de Guadalajara (derecha).	21
Figura 3. Esquema de la distribución espacial de las parcelas y el tipo de tratamiento. Los cuadros representan las parcelas, donde se indica el número de identificación de cada parcela y el tipo de tratamiento realizado. En color verde se representan las parcelas testigo (T), en color amarillo,	

las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento intenso (A), en color rojo, las parcelas con tratamiento muy intenso (B), y en color gris se representan las parcelas utilizadas como reserva (R). En color marrón se muestran los caminos de acceso a las parcelas. 23

Figura 4. Evolución de la altura del árbol entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). 28

Figura 5. Evolución de la altura de inicio de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). 29

Figura 6. Evolución del diámetro en la base del fuste entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). 30

Figura 7. Evolución del diámetro medido a 50 cm de la altura del árbol entre los años 2000 y 2005 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). 31

Figura 8. Evolución del diámetro medido a 100 cm de la altura del árbol entre los años 2001 y 2005 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). 31

Figura 9. Evolución del diámetro medido a 130 cm de la altura del árbol de los años 2010 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). 32

Figura 10. Evolución del diámetro de inicio de copa viva entre los años 2000 y 2005 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). 32

Figura 11. Evolución del diámetro de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). 33

Figura 12. Evolución del espesor de corteza en la base y a 1.30 m en el año 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). 34

Figura 13. Evolución del índice de razón de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). 35

Figura 14. Evolución del índice de esbeltez entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). 36

Figura 15. Biomasa de las acículas y yemas, ramas, fuste y total, del año 2011 según el tratamiento aplicado. Se observan diferencias entre los tratamientos de clareo A y B y las parcelas testigo (T).....	36
Figura 16. Biomasa media por parcela en acículas y yemas, ramas, fuste y biomasa total según el tratamiento aplicado (T, A, B). Letras diferentes muestran diferencias significativas.....	37
Figura 17. Promedio de piñas por parcela en cada tratamiento. Se observan diferencias entre los tratamientos de clareo A y B y las parcelas testigo (T).....	38
Figura 18. Banco aéreo (piñas/ha) en función del tratamiento (T, A, B) y el año de producción de las piñas.	39
Figura 19. Número máximo de piñas presentes en cada parcela por años. Se observan diferencias entre los tratamientos de clareo A y B y las parcelas testigo (T).	40
Figura 20. Número máximo de piñas por parcela, en total. Se observan diferencias entre los tratamientos de clareo A y B y las parcelas testigo (T).....	40
Figura 21. Distribución y numeración general de los pies individuales de las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento T o A.	49
Figura 22. Distribución y numeración general de los pies individuales de las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento B.....	49
Figura 23. Evolución de la altura del árbol entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).....	50
Figura 24. Evolución de la altura de inicio de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).	51
Figura 25. Evolución del diámetro de base entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).....	51
Figura 26. Evolución del diámetro de inicio de copa entre los años 2000 y 2005 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).	52
Figura 27. Evolución del diámetro de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).	52

Figura 28. Evolución del índice de razón de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3). 53

Figura 29. Evolución del índice de esbeltez entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3). 53

Preámbulo

Este Trabajo de Fin de Máster se plantea dentro de una de las líneas de investigación del Laboratorio de incendios forestales del Centro de Investigación Forestal (CIFOR), perteneciente al Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).

Debido a la situación de emergencia establecida por la COVID-19 y el cambio de enfoque en el trabajo práctico referente a la obtención de datos del año 2020, tanto los datos como la metodología de trabajo que se muestra a lo largo de este documento se corresponden a los datos obtenidos por el personal del INIA responsable del proyecto entre los años 2000 y 2018. Algunos de los resultados publicados previamente de manera parcial entre los años 2004 y 2014 han sido revisados y actualizados para dar una visión más global del proceso y se presenta por primera vez como trabajo completo de seguimiento de estas parcelas permanentes. Así mismo se han analizado con más detalle variables que en los estudios previos no se estudiaron con suficiente profundidad como es el caso del número de piñas (fructificación), de vital importancia para entender el efecto del tratamiento en la resiliencia al fuego de la masa estudiada de cara a la evaluación de su eficacia en procesos de restauración.

Resumen

Especies forestales mediterráneas como *Pinus pinaster*, con adaptaciones al fuego presentan, en general, buena regeneración natural tras incendios, dando lugar en ocasiones a masas de gran densidad donde se recomienda la restauración pasiva a corto plazo, pero que a medio y largo plazo podría tener consecuencias negativas en el futuro desarrollo del rodal. La aplicación de clareos tempranos para dosificar la competencia intraespecífica del regenerado se ha planteado como una alternativa barata que se realiza por los servicios forestales pero que no está lo suficientemente contrastada a nivel científico. Permite el desarrollo de una masa de mejor calidad, disminuyendo el peligro de incendios a medio plazo y la vulnerabilidad a posibles nuevos incendios como consecuencia del cambio global (cambio climático y abandono rural).

En este trabajo se exponen los resultados del estudio de distintas intensidades de tratamientos selvícolas en masas de *Pinus pinaster* Ait. regeneradas de forma natural tras un incendio en el monte "Fraguas" en la provincia de Guadalajara (Sistema Ibérico Central). El objetivo es comparar el efecto de dos tratamientos, intenso (A) y muy intenso (B) de clareo frente a parcelas testigo (T), en parcelas permanentes (2000-2018) y conocer su efecto en el desarrollo y crecimiento de la masa tras la medición de distintas variables dasométricas a lo largo del tiempo, biomasa y fructificación y su análisis estadístico utilizando el software R®.

Las parcelas tratadas presentan mayor altura, diámetro, biomasa, fructificación, mayor razón de copa y menor esbeltez. Los mayores cambios se han observado tras la aplicación de tratamientos muy intensos (B). Concluimos que los clareos tempranos intensos en masas de *Pinus pinaster* presentan efectos positivos en el crecimiento, la biomasa de las copas y la fructificación, lo que favorece una estructura menos vulnerable a nuevos incendios. Los resultados mostrarían la eficacia de la selvicultura de apoyo a la restauración pasiva en masas con buena regeneración natural y alta competencia intraespecífica.

Palabras clave: clareo, pino rodeno, regeneración post-incendio, tratamiento selvícola, vulnerabilidad a incendios.

Abstract

Some forests Mediterranean species such as *Pinus pinaster* have fire traits and present, in general, a good natural regeneration after fires, sometimes give rise to dense stands where passive restoration is recommended in the short term, but which in the medium and long term could have negative consequences on the future development of the stand. The application of early thinning to dose the intraspecific competition has been proposed as a cheap alternative that is carried out by forest services but is not sufficiently contrasted at a scientific level. It allows the development of a better-quality stand, reducing the danger of fire in the medium term and the vulnerability to possible fires as a result of global change (climate change and land abandonment).

This work presents the results of the study of different intensities of forest treatments in stands of *Pinus pinaster* Ait. regenerated naturally after a fire in the "Fraguas" mountain in the province of Guadalajara (Central Iberian System). The objective is to compare the effect of two treatments, intense (A) and very intense (B) of thinning against control plots (T), in permanent plots (2000-2018) and to know their effect on the development and growth of the stand after the measurement of different dasometric variables over time, biomass and fructification and their statistical analysis using the R® software.

The treated plots show greater height, diameter, biomass, fructification, greater crown ratio and less slenderness. The greatest changes have been observed after the application of very intense treatments (B). We conclude that intense early non-commercial thinning in *Pinus pinaster* stands has positive effects on growth, crown biomass and fruitiness, which favours a structure less vulnerable to new fires. The results would show the effectiveness of silviculture and forestry treatments to support passive restoration in stands with good natural regeneration and high intraspecific competition.

Keywords: thinning, Maritime pine, post-fire regeneration, forestry treatment, fire vulnerability.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Marco conceptual

1.1.1 *Incendios forestales*

Los incendios forestales constituyen una de las perturbaciones más importantes que afectan a las comunidades vegetales terrestres, suponiendo una amenaza para la estabilidad de las masas (Brotons et al., 2013). Ya sean de origen natural o antrópico, éstos han influenciado en gran medida el carácter de los ecosistemas naturales a nivel mundial a lo largo del tiempo, con un claro impacto tanto ambiental como socioeconómico (Budde et al., 2014; Nyland, 2016).

Considerando la ubicación geográfica de este trabajo, los ecosistemas mediterráneos (entre los que se incluye la cuenca mediterránea, la costa de California, el suroeste de Australia, la costa de Chile y algunas zonas en Sudáfrica (Meira-Neto et al., 2011)), están sujetos regularmente a un elevado número de incendios de intensidad generalmente intermedia y una recurrencia cada 10-40 años (Fernandes y Rigolot, 2007). En estas zonas, un promedio de 45.000-50.000 incendios destruyen de 700.000 a 1.000.000 hectáreas de bosques mediterráneos anualmente, causando una enorme destrucción tanto a nivel ecológico como económico y teniendo un riesgo de desertificación asociado (Meira-Neto et al., 2011). En cierta medida, esto es resultado de la marcada estacionalidad existente, es decir, precipitaciones y bajas temperaturas en los meses de invierno, y sequía y altas temperaturas en el periodo estival (Herrero de Aza et al., 2004).

De manera general, la presencia repetida de incendios en una zona puede ocasionar una degradación forestal vegetativa y fisicoquímica. La primera de ellas afecta principalmente a la estructura de la masa, su composición y su desarrollo. Incluye aquellos impactos que dan lugar a una alteración de la composición específica, modificando la condición del bosque hacia un estado alejado de las condiciones originales, destacando una especial dificultad para recuperar dichas condiciones óptimas (Nyland, 2016). El efecto e impacto que presenta sobre la vegetación y sobre la estación es variable en función de aspectos tales como el clima de la zona, la topografía, el combustible consumido durante el incendio, así como a los atributos de cada régimen de incendios (estacionalidad, periodo de retorno, tamaño, extensión, complejidad, tipo de fuego, intensidad o severidad del incendio) (Serrada, 2011).

Teniendo en cuenta que los regímenes de incendios están determinados por interacciones complejas entre clima, uso del suelo, atributos de la vegetación y el patrón de ignición. (Brotons et al., 2013), el cambio global, incluyendo el cambio climático y los cambios en los usos del suelo, es un factor clave en la alteración de los regímenes de incendios en la cuenca mediterránea. Se espera que estos cambios en el uso del suelo, los cambios predichos en el clima durante este siglo y el aumento en los eventos climáticos extremos, como futuras tendencias en los ejes impulsores de los incendios, tengan un gran impacto en el riesgo de incendios (Meira-neto et al 2011), (Figura 1), dando lugar a cambios en los regímenes de incendios regionales.

Entre estos cambios destaca el incremento del número de incendios y aumento de su impacto y severidad en los ecosistemas a nivel mundial, con efectos desconocidos en los servicios ecosistémicos presentes y futuros y en los patrones de biodiversidad, así como puede originarse una expansión de ecosistemas áridos y semiáridos adyacentes (Muscolo et al., 2017), lo cual ha sido confirmado por datos obtenidos durante el último siglo (Beer et al., 1988) y por estudios paleontológicos (Clark, 1990). Por otra parte, respecto a los impactos sobre la biodiversidad, aunque de un ciclo de incendios al siguiente la composición específica en un momento determinado tras un incendio forestal no cambia de manera significativa, la estructura de las comunidades vegetales sí se suele ver modificada bajo la mayor parte de los regímenes de incendios forestales (Meira-Neto et al., 2011).

Los incendios forestales son altamente sensibles al cambio climático, de manera similar a otros procesos ecosistémicos, ya que su comportamiento es dependiente de la humedad que presenta el combustible disponible, lo cual a su vez se ve afectado por la precipitación, la humedad relativa, la temperatura del aire y la velocidad del viento. De esta manera, estudios realizados al respecto establecen que los mayores riesgos de incendios forestales, así como la mayor severidad de estos, presentan una relación directa con incremento de la temperatura máxima y la menor precipitación y humedad relativa durante el periodo de verano (Moriondo et al., 2006).

Varios estudios han observado un incremento general en el riesgo de incendios en los países pertenecientes a la cuenca mediterránea, con un impacto elevado en aquellas zonas donde la cubierta vegetal es muy alta. Las consecuencias de este impacto del cambio climático en el régimen de incendios en los países de la cuenca mediterránea pueden tener un impacto significativo en los ecosistemas, debido a la probabilidad de incrementar el área quemada y la intensidad y severidad de los incendios (Moriondo et al., 2006).

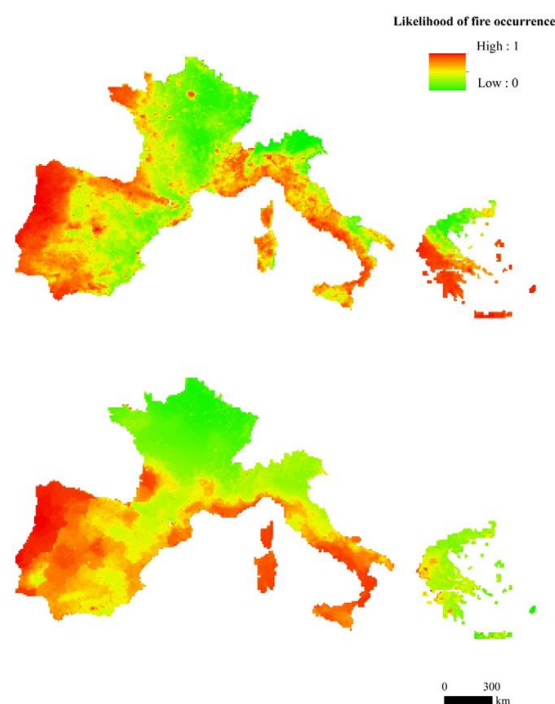


Figura 1. Mapas de la probabilidad de incendios obtenidos mediante modelos regresión lineal (imagen superior) y modelos "Random Forest" (imagen inferior). De color rojo se muestra una mayor probabilidad de incendios, mientras que la probabilidad más baja está representada en color verde. Fuente: Oliveira et al., 2012.

Los incendios forestales juegan, a su vez, un papel fundamental en el balance de carbono neto de los bosques, por lo que puede afectar a las emisiones de gases de efecto invernadero, con un consecuente efecto en el cambio climático (Moriondo et al., 2006).

1.2 Fundamentos teóricos

1.2.1 Vegetación adaptada al fuego en ecosistemas mediterráneos

El fuego juega un papel importante en la modificación de las comunidades vegetales en general, y en el mediterráneo en particular (Bengtsson et al., 2000; Lloret et al., 2002; García-Jiménez et al., 2017; Cutino et al., 2018). Debido a estos patrones climáticos existentes, la presencia periódica de incendios, la presión selectiva que las especies vegetales han sufrido a lo largo del tiempo, y como resultado de procesos evolutivos asociados a los incendios, ha inducido a que la vegetación generalmente dominante de los ecosistemas mediterráneos presenten diferentes grados de adaptación al fuego, y en general alta resiliencia y regeneración natural tras su incidencia (Buhk et al., 2006; Keeley et al., 2011; Serrada, 2003; Cutino et al., 2018).

Como ejemplo de ello en la región mediterránea, algunas especies arbóreas como por ejemplo las coníferas *Pinus halepensis*, *Pinus banksiana*, *Pinus brutia* o *Pinus pinaster*, se ven favorecidas por la presencia de incendios forestales (Meira-Neto et al., 2011; Herrero de Aza et al., 2004), con cierta habilidad de volver a un estado previo a la perturbación (Hanes, 1971; Trabaud y Galtié, 1996; Moya et al., 2011, Cutino et al., 2018). En cambio, tanto los resultados de la regeneración post-incendio como la velocidad de regenerado puede variar dependiendo de varios factores, como la naturaleza de la perturbación o la fuente de semillas (Serrada, 2003) así como si el ecotipo de la especie presenta serotinia, característica que más determina el éxito de la regeneración post-incendio (Vega et al. 2008).

Esta regeneración natural guarda relación con el concepto de resiliencia ecológica, una característica general de los pinares mediterráneos, es decir, la capacidad que presenta un ecosistema para recuperar las funciones existentes antes de producirse una perturbación (Meira-Neto et al., 2011). Otros conceptos relacionados son la resistencia, es decir, la inercia de un ecosistema frente a un cambio, y la persistencia o capacidad de un ecosistema de regenerarse (Meira-Neto et al., 2011). La alta resistencia a los incendios observada en los ecosistemas mediterráneos está determinada por dos grupos funcionales de plantas con dos estrategias básicas de regeneración y perpetuación que pueden adoptar las especies arbóreas características de estas zonas ante esta situación (Keeley y Zedler, 1978; Calvo et al., 2003; Cutino et al., 2018) En primer lugar, estrategias resistentes, donde las especies presentan órganos de protección que les permiten sobrevivir a los incendios anulando los efectos nocivos

que presenta. En segundo lugar, se encuentran las estrategias persistentes, las cuales constan en el rebrote de órganos presentes en el tallo o en las raíces (Meira-Neto et al., 2011).

1.2.2 *Pinus pinaster*

Entre las especies mencionadas resalta *Pinus pinaster* Ait, conocido comúnmente como pino rodeno, es una especie forestal autóctona de la cuenca del Mediterráneo occidental, distribuida principalmente a lo largo de la Península Ibérica, Francia e Italia. (Fernandes y Rigolot, 2007; González-Alday et al., 2009). En España se considera la segunda especie arbórea en extensión superficial, ocupando una superficie cercana a 1.060.000 hectáreas en masas monoespecíficas, además de 620.000 hectáreas junto a otras especies, lo cual incluye tanto repoblaciones como pinares naturales (Rodríguez et al., 2008). El pino rodeno constituye uno de los principales ecosistemas propensos a incendios forestales de la Península Ibérica (Calvo et al., 2016). Se trata de una especie muy inflamable, especialmente durante los meses de verano (Serrada, 2011).

En la serie histórica está siempre entre las 3 especies más afectadas por los incendios en España junto a *Pinus halepensis* y *Quercus ilex*. Así por ejemplo fue la especie más afectada por los incendios forestales durante el periodo comprendido entre los años 1996 y 2000, donde hubo 36.000 ha incendiadas, suponiendo el 25% de la superficie arbórea total quemada en dicho período.

Esta especie presenta un marcado temperamento heliófilo, robusto e intolerante a la sombra, resiliente (Rodríguez et al., 2008) y resistente al fuego y parcialmente serótina (Fernandes y Rigolot, 2007), con una clara facilidad de regeneración, entre lo cual se incluye la regeneración post-incendio (Rodríguez et al., 2008), ya que los conos seróticos de muchos de los ecotipos de esta especie se ven especialmente favorecidos por el fuego (Cutino et al., 2018). Tras un evento de perturbación de este tipo, las coníferas mediterráneas dependen únicamente de la reproducción sexual mediante semillas, siendo incapaces de rebrotar (Pausas et al., 2008; Calvo et al., 2016; García-Jiménez et al. 2017; Cutino et al., 2018).

Distintas adaptaciones en relación con la acumulación de un banco de semillas, como los procesos de floración y fructificación precoz, presencia de conos seróticos, etc., permiten la regeneración del pino rodeno tras incendios forestales. Entre estas adaptaciones destaca la abundancia de semillas y la influencia de la serotinia como elementos clave en el proceso de regeneración post-incendio de especies pertenecientes a este género (*Pinus*) (Vega-Hidalgo, 2003).

La regeneración natural tiene lugar de manera continua hasta los tres años después de un incendio, gracias al almacenamiento a largo plazo de semillas en conos seróticos, los cuales son conos que liberan las semillas solamente tras la exposición a altas temperaturas (Fernandes y Rigolot, 2007, Calvo et al., 2016), aunque también se puede conseguir la regeneración natural en ecotipos sin serotinia (Madrigal et al. 2005, 2011, Vega et al. 2008) debido al abundante banco

aéreo disponible. El papel del banco de semillas, su tamaño y longevidad, es una parte esencial de la respuesta de la comunidad vegetal al fuego, condicionando la posibilidad de regeneración, ya que constituye la única fuente de conservación de la variabilidad genérica y, por tanto, ejerce un papel importante en el mantenimiento de la biodiversidad de la zona. Esta característica, junto con la respuesta germinativa tras el fuego, debe tenerse en cuenta en masas de coníferas y en especial en los pinares que presentan una alta vulnerabilidad a los incendios forestales.

Además, tienen lugar modificaciones en el lecho de germinación producidas por el incendio, lo que presenta repercusiones en la regeneración. Las altas temperaturas generadas por el fuego pueden afectar a la viabilidad y a la germinación de la semilla (Rodríguez et al., 2008) y a las características del lecho orgánico y el suelo mineral (Vega et al. 2008).

La regeneración natural que tiene lugar tras un incendio forestal en especies adaptadas al fuego, como es el caso de *Pinus pinaster*, suele dar lugar a una elevada espesura y densidad de regenerado durante los primeros años. Por tanto, una vez que mediante la restauración pasiva se ha conseguido el éxito regenerativo a corto plazo puede ser necesaria la aplicación de tratamientos selvícolas con el objetivo de mejorar las características de la masa, así como su futuro desarrollo. La presencia de una espesura excesiva sin gestión de las masas tiene consecuencias tales como el riesgo de inestabilidad en los pies adultos, una mayor esbeltez de los pies individuales, mayor vulnerabilidad frente a factores bióticos y abióticos y disminución de las funciones tanto selvícolas, ambientales y socioeconómicas. Por lo tanto, suele ser necesario aplicar tratamientos selvícolas de mejora en las masas y es una práctica habitual por parte de los servicios forestales, aunque no siempre avalada por resultados científicos.

Desde el punto de vista socioeconómico, entre los principales usos tradicionales que presenta en España, destaca la obtención de resina y la producción de madera. Actualmente existe un cambio en las prácticas de gestión hacia la creación de masas multifuncionales, dada la reducción de la actividad resinera y la menor importancia económica de la madera. De este modo, se pretende preservar los atributos estructurales y funcionales de los ecosistemas forestales y la conservación de la naturaleza. Entre las alternativas de gestión se contemplan diferentes intensidades de corta con el objetivo de inducir la revegetación natural y contribuir de esta manera a mantener el paisaje, las funciones ecológicas, la producción de hongos, la composición de las especies de sotobosque, el número de especies endémicas, la singularidad de los elementos y la obtención de madera y resina de manera sostenible (González-Alday et al., 2009). Esta gestión debería ser compatible con la reducción de vulnerabilidad a perturbaciones como los incendios forestales. El fuego es una perturbación que juega un papel fundamental en la perpetuación de las masas de pinos mediterráneos, constituyendo un factor clave en las masas de *Pinus pinaster* (Fernandes y Rigolot, 2007). De este modo, el conocimiento de la respuesta al fuego de esta especie resulta fundamental a la hora de establecer cualquier acción encaminada a una mejor y más rápida recuperación del ecosistema tras este tipo de perturbación.

1.2.3 Selvicultura y restauración ecológica

Teniendo en cuenta la importancia que presenta *Pinus pinaster*, sus características y el régimen de incendios que suele presentar en ecosistemas mediterráneos, puede resultar útil la aplicación de técnicas y tratamientos selvícolas con el objetivo de mejorar estas masas tras la incidencia de incendios forestales.

La selvicultura, cuyo origen, tanto de la ciencia como de la práctica, se sitúa hace más de dos siglos, derivado del notable aumento del impacto del ser humano en los bosques y en la escasez de madera en algunas zonas (Bannister et al., 2016), puede presentar diferentes definiciones en función del autor. Según Nyland (2016), la selvicultura puede definirse como una disciplina que se ocupa tanto de la gestión de los montes como de los métodos para establecer y mantener comunidades, entre las cuales se encuentran principalmente especies arbóreas, aunque también otros tipos de vegetación, como vegetación herbácea o matorral. Otras definiciones incluyen el modo de aplicar el conocimiento existente de aspectos tales como la estructura, el crecimiento, la reproducción y las formas de agrupación de las masas o vegetales presentes en los montes. Todo ello conlleva la obtención de una producción de bienes y servicios de manera continua necesarios para la sociedad (Serrada, 2011). Sus fundamentos incluyen diferentes puntos de vista, teniendo relación con las ciencias biológicas, la ecología y con otros aspectos económicos y administrativos (Nyland, 2016).

La selvicultura asegura la continuidad a largo plazo de funciones ecológicas esenciales y la salud y productividad de ecosistemas forestales gestionados. Las prácticas de gestión utilizadas en selvicultura, generalmente las cortas, modulan de manera simultánea la disponibilidad de los recursos, entre los que se encuentran los nutrientes presentes en los suelos, la luz y el agua (Bannister et al., 2016). En relación con esto, uno de los principales retos a los que se enfrenta la selvicultura moderna, y también uno de sus objetivos principales, es la combinación de la producción selvícola, por ejemplo, la producción maderera, de resina, etc. a partir de las masas forestales, y la conservación de la biodiversidad mediante prácticas de gestión adecuadas (González-Alday et al., 2009). Así, en el contexto de la restauración forestal, la selvicultura tiene como propósito el aumento de biodiversidad y complejidad estructural para la mejora de la funcionalidad ecológica y, como consecuencia, el incremento de los bienes y servicios ecosistémicos potenciales que presentan distintos tipos de bosque: bosques adultos que se encuentren degradados, en bosques secundarios tanto con una densidad normal como degradados, en bosques quemados y en plantaciones (Bannister et al., 2016). Igualmente, la silvicultura busca, entre otras cosas, promover la regeneración arbórea alterando las variables abióticas y bióticas que la afectan (luz, nutrientes, agua, cama de semillas, fuente de semillas, etc.) (Bannister et al., 2016).

De la misma manera, la selvicultura presenta una relación y semejanza con la restauración ecológica o restauración de ecosistemas (Sarr et al., 2004, Bannister et al., 2016), la cual consiste en “asistir a la recuperación de ecosistemas que han sido degradados, dañados o destruidos”, según la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (SER).

Stanturf, Palik, and Dumroese (2014) establecen que cuando la restauración es definida como una práctica está utilizando técnicas de la selvicultura. En esta línea, algunos autores consideran que no existe una distinción real entre la selvicultura y la práctica de la restauración, a excepción de que las técnicas que son utilizadas en restauración ecológica son comúnmente realizadas bajo circunstancias de mayor degradación ecosistémica (Bannister et al., 2016). Bajo esta consideración, la selvicultura constituye una herramienta clave para la restauración de bosques, incluyendo técnicas de plantación, manipulación de la composición, estructura o crecimiento de masas forestales y aplicaciones más complejas entre las que se puede encontrar la restauración de masas forestales degradadas o la conversión de plantaciones de especies exóticas hacia bosques naturales (O'Hara, 2001)

Dentro de la selvicultura y en relación con el presente trabajo, se encuentran ramas como la dendrometría y la dasometría, las cuales resultan esenciales en estudios de masas forestales. De este modo, la dendrometría se define como una rama de la ciencia forestal que se ocupa de las mediciones o variables de medida en el árbol, permitiendo la determinación cuantitativa de diferentes variables en relación con los recursos forestales. Por otra parte, la dasometría, es una doctrina que se centra en la masa forestal en su conjunto como objeto de medición, abarcando un mayor número de individuos muestreados. En este estudio, pese a que se ha realizado una medición en cada árbol en particular, hablamos de variables dasométricas puesto que el objeto de medición sobre el cual se quiere obtener unos resultados es la masa forestal.

1.2.4 Tratamientos selvícolas: clareos

Las masas procedentes de regeneración natural normalmente presentan densidades iniciales muy elevadas, para lo cual es necesario intervenir activamente. El procedimiento más adecuado en estas masas es la aplicación de clareos tempranos, de manera que se reduzca el número de pies regenerados tras el incendio forestal. El clareo consiste en la extracción de pies de la masa principal en los estados de repoblado y monte bravo, es decir, en masas jóvenes (Serrada, 2011). Los clareos se engloban dentro de los tratamientos parciales de mejora aplicados al vuelo, en este caso, sobre el arbolado. El objetivo principal de este tratamiento es favorecer los pies que presenten un mejor desarrollo y reducir la competencia interespecífica en el rodal. Como consecuencia de ello, el agua y los nutrientes que se encuentran disponibles en el suelo no se ven malgastados tras la mortalidad de aquellos pies dominados en el caso de que no se apliquen clareos tempranos (Serrada, 2011). En el caso de la aplicación de clareos tempranos en arbolado con una edad inferior a 10 años, de poco desarrollo y diferenciación social de los pies, el criterio que se tiene en cuenta es sistemático, donde se extrae un número determinado de árboles (peso del clareo) que nos lleven a una densidad final deseada (Rodríguez et al., 2008).

El criterio de selección en los clareos se centra en cortar, en los grupos o bosquetes de excesiva densidad, los pies mal conformados, deformes, dominados o afectados por plagas y enfermedades, dado el temperamento y características de forma del fuste en esta especie. (Rodríguez et al., 2008), aunque al no haberse iniciado la poda natural no hay identificación de

dominados. Entre las técnicas de ejecución de los clareos tempranos se encuentra la selección pie a pie, apeando con hacha, motosierra ligera o moto desbrozadora, o, arrancando los pies sobrantes en caso de haber suficiente humedad en el suelo y presentar un tamaño adecuado para ello. En ocasiones pueden realizarse clareos por cortas a hecho en bandas alternas con una desbrozadora acoplada al tractor (Serrada, 2011). Los clareos tempranos del regenerado post-incendio se efectúan por calles si la mecanización es posible y manualmente en caso contrario (Rodríguez et al., 2008). En cualquier situación, resulta necesario desbrozar manualmente con moto desbrozadora con el objetivo de favorecer el desarrollo del regenerado y eliminar la competencia intraespecífica por el agua, nutrientes, luz y espacio (Serrada, 2011).

Cabe destacar el orden en el que la vegetación, de manera general, prioriza el uso de los productos obtenidos en la fotosíntesis. De este modo, en primer lugar, estos productos son empleados en la respiración celular de cada ejemplar, seguido de la renovación tanto de hojas como de raíces finas y posteriormente se produce el crecimiento longitudinal. Exclusivamente cuando se han satisfecho las necesidades anteriores, es posible el crecimiento en grosor, así como la producción de metabolitos secundarios, entre los que se encuentra, por ejemplo, la producción de resina. Asimismo, conociendo dicho orden priorizado en el reparto de los carbohidratos producidos en la fotosíntesis, en aquellas situaciones de elevada competencia por exceso de espesura, afectando negativamente a la cantidad de biomasa foliar y, por tanto, a la capacidad fotosintética, lo primero que se ve afectado es el crecimiento en diámetro. Solo después, los árboles en peores condiciones empiezan a estar también dominados en altura (Serrada, 2011).

En relación con *Pinus pinaster*, la aplicación de clareos puede presentar un efecto notable en la mejora de la rectitud de los pies, al reducir la densidad y al extraer los pies que presenten curvaturas basales y/o sinuosidades en el fuste. Esto hace posible un correcto desarrollo de las copas (Rodríguez et al., 2008). Mediante la aplicación de clareos se evita que las masas en un futuro presenten una densidad y espesura excesivas, lo cual puede derivar en un mayor riesgo de mortalidad de los pies dominados, reducción del crecimiento diametral del conjunto, una elevada esbeltez, es decir que estén excesivamente delgados en relación con su altura presentando una baja estabilidad mecánica, y la competencia interespecífica por luz, agua y espacio explorado por raíces. Además, permite evitar la afección de incendios, disminuyendo la continuidad de la masa y la biomasa total disponible en el rodal, disminuyendo significativamente el riesgo de incendios de copa (Fernández-Alonso et al. 2013, Jiménez et al. 2013). De esta manera, los clareos permiten reducir la densidad y espesura de las masas, por lo que a medio plazo se ve reducida la competencia intraespecífica. Esta reducción de la competencia da lugar a pies con mejor desarrollo y crecimiento. Efectivamente, se ha encontrado una respuesta positiva frente al clareo temprano del crecimiento en diámetro, diámetro de copa, menor esbeltez, biomasa de acículas o producción temprana de piña, aunque la respuesta varía en función de su intensidad (Madrigal et al. 2006).

Se trata de intervenciones de apoyo a la regeneración que resultan muy indicadas en el caso de que la densidad de regenerado sea muy elevada (Rodríguez et al., 2008), lo cual es frecuente, por ejemplo, en los regenerados producidos tras incendios forestales de pinares adultos como *Pinus halepensis* y de *Pinus pinaster*. Poniendo como ejemplo a la especie *Pinus pinaster*, es frecuente que los regenerados tras incendios presenten densidades excesivas, superiores a 3.000 pies/ha, a edades de repoblado y monte bravo. En general, la densidad a partir de la cual resulta necesario aplicar clareos a la masa regenerada depende principalmente de la calidad de la estación y del temperamento de la especie, aproximadamente entre 3.000 y 3.500 pies/ha para especies de luz y 10.000pies/ha para especies de sombra (Serrada, 2011).

1.2.5 Variables dasométricas

La probabilidad de que se originen incendios de copa depende en gran medida de la biomasa de la copa, la densidad de copas y la altura de inicio de copa viva. La cuantificación de estas variables es necesaria para la selección de apropiados tratamientos selvícolas en las masas con el objetivo de reducir la susceptibilidad a que se produzcan incendios de copa (Fernández-Alonso et al., 2013). La correcta estimación del combustible disponible en las copas que se consume durante los incendios de copa es crítica para el conocimiento del comportamiento de este tipo de incendios, así como para cuantificar las emisiones de carbono y otros gases (Jiménez et al., 2013).

La densidad de copas y la altura de inicio de copa viva son variables utilizadas para determinar la probabilidad de inicio de incendios de copa y su propagación. La estimación de éstas se realiza de manera indirecta. (Gómez-Vázquez et al., 2013). En general, algunas variables útiles medidas en las masas forestales son: la altura (altura total, altura de inicio de copa viva, altura de inicio de yemas), diámetro (diámetro de copa, diámetro de base, diámetro de inicio de copa viva), espesor de corteza (en la base, a 1,30 m de altura), esbeltez (relación entre altura y diámetro), biomasa (peso seco del fuste, ramas, acículas, yemas, piñas mediante muestreo destructivo) o número de piñas.

1.3 Antecedentes y estado actual

El estudio de las masas de *Pinus pinaster* y de su regeneración tras incendios forestales y más concretamente en la Península Ibérica, se ha explorado en varias ocasiones, puesto que se trata de una de las especies arbóreas más características del Mediterráneo.

En relación con el tema de estudio, existen varias publicaciones referentes a la regeneración de *Pinus pinaster* tras incendios forestales en ecosistemas mediterráneos, entre ellas, se han realizado otros estudios en relación con *Pinus pinaster* y su regeneración tras incendios forestales en España, como por ejemplo en zonas de la Sierra de Guadarrama en Madrid (Madrigal et al., 2005) o en Rodenales de Molina (Madrigal et al. 2011) en relación con la densidad inicial y supervivencia de las plántulas.

En el noroeste de la Península Ibérica, en Galicia, existen estudios de la influencia de la severidad de los incendios, serotinia y manejo post-incendio de las masas de *Pinus pinaster* afectadas (Jiménez et al. 2008, Vega et al., 2008); estudios de las características del combustible en relación con el potencial de incendios de copa en pinares en Galicia (Fernández-Alonso et al., 2013); modelización de variables de biomasa en *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* en el noroeste de España (Gómez-Vázquez, et al., 2013); y otros aspectos como las emisiones de carbono en incendios de copa activos en Galicia (Jiménez et al., 2013). Además, se han realizado estudios acerca de la regeneración natural de esta especie tras incendios y tras clareos con desbrozadora de eje vertical en Orense (Martínez-Chamorro y Rodríguez-Soalleiro, 2003), donde se destaca la recomendación general de realizar intervenciones tempranas antes de los cinco años en contraste con actuaciones tardías, suponiendo en este último caso costes mucho mayores; además de la aparente necesidad de aplicar tratamientos con el fin de evitar el estancamiento de la masa y la pérdida de su viabilidad futura. Asimismo, hay estudios a corto plazo de las masas de *Pinus pinaster* en Guadalajara, del mismo modo que el presente trabajo (Madrigal et al. 2004, Madrigal et al., 2006; Madrigal et al., 2014). En cambio, el comportamiento potencial de incendios forestales tras tratamientos selvícolas, así como otros aspectos relacionados, no presentan demasiada bibliografía al respecto y en general solo a escala de paisaje (e.g. Madrigal et al. 2017).

2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo principal de este trabajo es conocer los efectos sobre el arbolado que presentan distintas intensidades de tratamientos selvícolas de clareo temprano e intenso en masas de *Pinus pinaster* que se han regenerado de manera natural tras un incendio forestal en el monte “Fraguas” en Guadalajara, España.

En concreto se pretende conocer el estado de la biomasa respecto a zonas no tratadas y analizar si dichos tratamientos mejoran la estabilidad de la masa a medio plazo y si disminuyen la susceptibilidad y resiliencia a futuros incendios.

En este trabajo se analizan las variables medidas a lo largo del tiempo desde el comienzo de los experimentos en el año 2000 hasta el año 2018, cuando se realizó la última medición disponible.

Las hipótesis a contrastar son tres: 1) que la aplicación de clareos tempranos en las masas de *Pinus pinaster* regeneradas de manera natural tras incendios forestales favorece el crecimiento en altura, diámetro y biomasa de los pies; 2) que la intensidad del clareo cambia la estructura vertical de los pies afectando a la esbeltez y la altura de inicio de la copa viva, variables importantes para evaluar la estabilidad de la masa y la susceptibilidad a los fuegos de copa; y 3) que los tratamientos aplicados afectan a caracteres claves en la vulnerabilidad a nuevos incendios como el espesor de corteza (aumento de la resistencia) y la fructificación (aumento de la resiliencia y persistencia).

El contraste de dichas hipótesis ofrecerá información sobre las ventajas e inconvenientes de las diferentes intensidades de clareo (o en su caso las ventajas de no intervenir) para apoyar la restauración de masas regeneradas de *Pinus pinaster* que presenten una alta densidad tras incendios forestales y preparar las masas a escenarios futuros de cambio global en los que se prevé un aumento de la recurrencia de incendios forestales y una disminución de la explotación forestal.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El estudio se realiza en el Monte “Fraguas” (Monte GU-1026), perteneciente al término municipal de Monasterio en la provincia de Guadalajara, Castilla-La Mancha, España (Figura 2).

El clima de esta zona es mediterráneo y presenta una temperatura anual de 10,4 °C. Las medias de las temperaturas máximas del mes más cálido son de 28,4 °C y la media de las temperaturas mínimas del mes más frío se sitúan alrededor de los -1,8 °C. Según la clasificación de Allué (1990), el fitoclima correspondiente es VI(IV). La precipitación media anual es de 766 mm. Respecto a las características de los suelos, el pH oscila entre 6 y 6,5 y las texturas son franco-arcillosas. Estos se asientan sobre granitos y presentan una productividad potencial forestal entre IIIa y IVb (Sánchez-Palomares y Sánchez-Serrano, 2000) con lo que se pueden calificar como de calidad media desde el punto de vista forestal. Las parcelas están ubicadas en la zona de umbría, debido al bajo grado de regeneración en la ladera de solana. La pendiente media es del 10%. Las coordenadas UTM de la zona son X= 490.000 m; Y= 4.540.200 m; Z= 1,150 m (Huso 30, Elipsoide Hayford, Datum EUR50) (Madrigal et al., 2006).

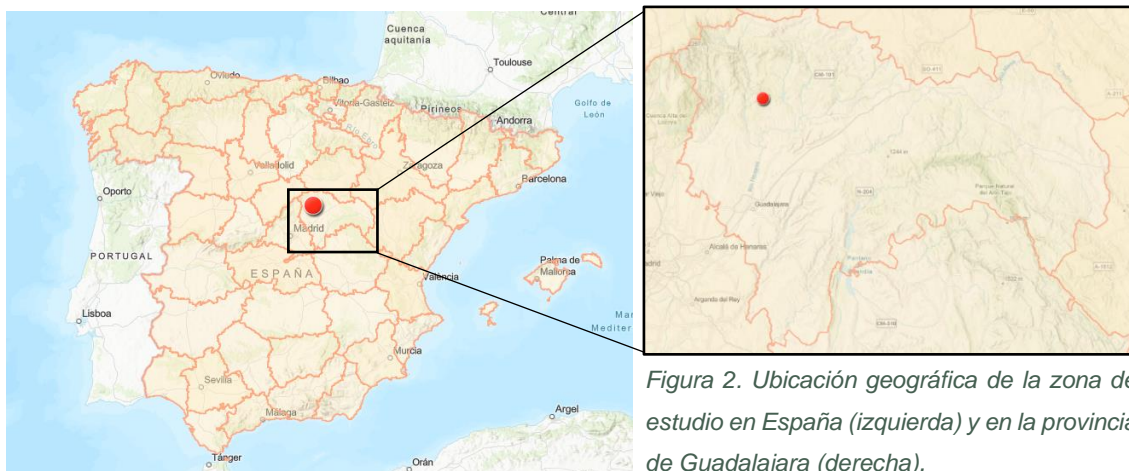


Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio en España (izquierda) y en la provincia de Guadalajara (derecha).

3.2 Especie y características de la masa

La especie dominante de la zona de estudio es una repoblación del pino rodeno (*Pinus pinaster* Ait.) realizada en los años 1971 y 1972 por los servicios forestales. El origen de la masa estudiada procede de una regeneración natural tras un incendio de 11,6 hectáreas que tuvo lugar en el año 1992. El regenerado existente en el año 2000 previo al inicio del experimento (con 8 años) era muy abundante, con una densidad inicial media de 10.417 ± 1.448 pies/ha (media \pm error estándar). Presentaba una altura media de 119 ± 3.70 cm, un diámetro medio en la base del fuste de 3.1 ± 0.13 cm y un diámetro de copa medio de 83.89 ± 2.89 cm.

3.3 Diseño experimental

Se establece un dispositivo experimental de 9 parcelas permanentes cuadradas de 20x20 m de lado. Las parcelas presentan unas condiciones ambientales homogéneas.

Se han aplicado dos tratamientos de diferente intensidad: un tratamiento A, intenso, donde se realiza un clareo y roza mecanizada por fajas, y un tratamiento B, muy intenso, donde se realiza un clareo y roza mecanizada por fajas, así como un clareo y desbroce manual en la entre faja. Se reservaron zonas testigo a las cuales no se ha aplicado ningún tratamiento selvícola (tratamiento T). A parte de los tratamientos propiamente dichos, se han mantenido parcelas de reserva (R) en caso de que tenga lugar algún imprevisto o para incluir nuevos tratamientos en el futuro. El resultado fue una intensidad media de clareo del 66% de los pies en el tratamiento A (densidad final media 4500 pies/ha) y un 81% de los pies en el tratamiento B (densidad final media 1500 pies/ha)

Los tratamientos se han asignado de manera aleatoria tras la caracterización de la masa mediante un diseño completamente al azar, es decir, las réplicas se han asignado aleatoriamente a cada parcela. Esto permite conocer el efecto que presentan las diferentes intensidades de tratamiento (A y B) frente a las parcelas testigo (T). Cada tratamiento presenta por tanto tres réplicas.

De cada parcela se etiquetaron y obtuvieron datos de 56 árboles en cada parcela donde se ha aplicado el tratamiento T o A (Figura 28, Anexos), mientras que en el caso de las parcelas tratadas con clareos muy intensos (tratamiento B), se etiquetaron pie a pie todos los árboles que quedaron en la parcela siendo la muestra de 70 árboles (Figura 29, Anexos). De igual modo, debido a la extracción de biomasa para la realización de muestreos destructivos para la cuantificación de biomasa viva, se han extraído árboles a lo largo del tiempo, así como debido a la muerte natural de algunos de ellos, disminuyendo levemente el tamaño muestral.

Tabla 1. Coordenadas UTM de las parcelas de Fraguas (Cogolludo-Guadalajara).

Parcela	Tratamiento	X	Y	Altitud	Fecha	Hora UT	n	s	PDOP	SQ
1	B1	489963	4540169	1141	19/02/02	14:40:07	30	3,5	4,2	
2	T2	489999	4540190	1132	20/02/02	10:51:45	20	0,9	4,8	
3	A3	490012	4540192	1145	20/02/02	10:53:14	20	0,6	3	
4	B3	490030	4540196	1146	20/02/02	10:54:31	20	0,7	2,6	
5	A2	490053	4540205	1149	20/02/02	10:55:41	20	0,4	2,5	
6	T2	490074	4540214	1142	20/02/02	10:56:42	20	0,6	2,5	
7	R1	490095	4540221	1145	20/02/02	10:58:01	20	0,5	2,5	
8	R2	490116	4540230	1137	20/02/02	10:59:06	20	0,6	2,5	Baja
9	A1	490135	4540237	1141	20/02/02	11:00:10	20	0,4	2,5	
10	R3	490078	4540190	1156	20/02/02	11:03:38	20	0,8	2,5	
11	B2	490102	4540200	1147	20/02/02	11:02:37	20	0,9	2,5	
12	T3	490125	4540209	1146	20/02/02	11:01:37	20	0,5	2,5	

Tabla 2. Tratamientos aplicados.

Tratamiento	Carácter	Actuaciones
A	Tratamiento intenso	Clareo y roza mecanizada por fajas.
B	Tratamiento muy intenso	Clareo y roza mecanizada por fajas, y clareo y desbroce manual en la entre-faja.
T	Testigo	No se ha aplicado ningún tratamiento.
R	Reserva	Parcelas reservadas, sin aplicación de ningún tratamiento. No se somete a análisis.

Tabla 3. Número de identificación de cada parcela para cada réplica de cada tratamiento.

Tratamientos	Nº de parcela		
Tratamiento A	9 (A1)	5 (A2)	3 (A3)
Tratamiento B	1 (B1)	11 (B2)	4 (B3)
Testigo (T)	2 (T1)	6 (T2)	12 (T3)
Reserva (R)	7 (R1)	8 (R2)	10 (R3)

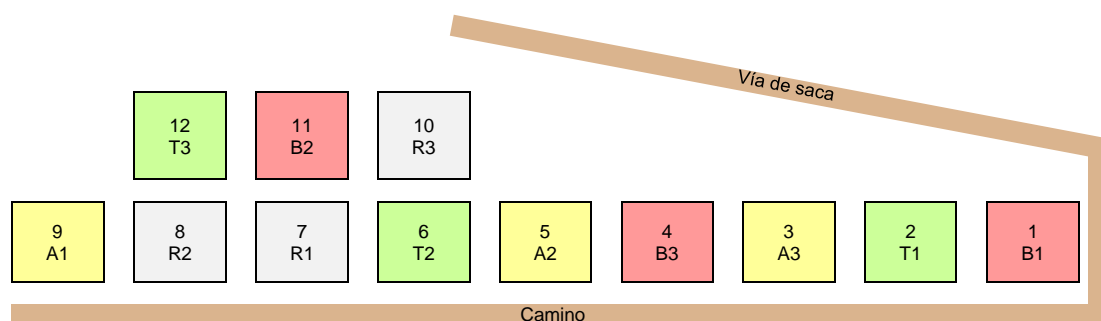


Figura 3. Esquema de la distribución espacial de las parcelas y el tipo de tratamiento. Los cuadros representan las parcelas, donde se indica el número de identificación de cada parcela y el tipo de tratamiento realizado. En color verde se representan las parcelas testigo (T), en color amarillo, las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento intenso (A), en color rojo, las parcelas con tratamiento muy intenso (B), y en color gris se representan las parcelas utilizadas como reserva (R). En color marrón se muestran los caminos de acceso a las parcelas.

3.4 Variables muestreadas

Se han recogido datos dendrométricos de cada árbol etiquetado en el dispositivo de parcelas permanentes, realizando medidas repartidas de variables dendrométrica (a nivel árbol) y dasométricas (a escala rodal) al principio anualmente (2000-2005) y a medio plazo en los años 2010 y 2018 (Tabla 4).

Tabla 4. Presencia de datos de cada variable en cada año de medición.

Parámetros	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2010	2018
Altura total	X	X	X	X	X	X	X	X
Altura de inicio de copa viva	X	X	X	X	X	X	X	X
Altura inicio de yemas					X	X		
Diámetro en la base	X	X	X	X	X	X	X	X
Diámetro a 50 cm	X	X	X	X	X	X		
Diámetro a 100 cm		X	X	X	X	X		
Diámetro a 1,30 m							X	X
Diámetro de copa 1	X	X	X	X	X	X	X	X
Diámetro de copa 2	X	X	X	X	X	X	X	X
Diámetro de copa (promedio)	X	X	X	X	X	X	X	X
Diámetro de inicio de la copa viva	X	X	X	X	X	X		
Espesor de la corteza (base)								X
Espesor de la corteza (1,30 m)								X
Piñas	X	X	X	X	X	X	X	X

A partir de algunas de estas variables se pueden calcular diversos índices selvícolas, con la finalidad de aportar una información más completa del estado y evolución estabilidad de la masa tras el tipo de tratamiento aplicado en cada parcela.

A partir de la longitud de copa viva y la altura total es posible determinar la razón de copa:

$$\text{Razón de copa} = \frac{\text{altura total} - \text{altura de inicio de copa}}{\text{altura total}} \cdot 100$$

Esto también puede definirse como el porcentaje de la altura del árbol medio ocupado por las ramas vivas, lo cual se comprende como el valor complementario de la altura alcanzada por la poda natural. La medición de esta poda natural en rodales regulares, como es el caso de masas de *Pinus pinaster* regeneradas tras incendios, es una manera eficaz de expresar la espesura existente, puesto que indica el resultado integrado de la densidad inicial, el temperamento de la especie, su porte específico y la calidad de la estación. Los valores de la razón de copa suelen ser crecientes con la edad y el diámetro del árbol manteniendo una espesura normal (Serrada, 2011). Una razón de copa del 100% indica la presencia de copa viva casi hasta el suelo, mientras que valores inferiores al 30% suelen indicar una situación crítica en términos de biomasa.

Por otra parte, a partir de la altura total y el diámetro es posible calcular el coeficiente de esbeltez de los pies individuales, así como la esbeltez promedio en cada parcela según el tratamiento que se haya aplicado. La esbeltez puede definirse como la relación existente entre la altura y el diámetro medio, medidas en las mismas unidades. Algunos factores de los que depende la esbeltez son la calidad de la estación, las características de la especie y la espesura que ha habido en la masa (Serrada, 2011).

$$\text{Esbeltez} = \frac{\text{altura}}{\text{diámetro}}$$

Otros parámetros medidos en campo en los años 2005 (Madrigal et al. 2006) y 2011, en este caso relacionados con la biomasa y los combustibles de copa. Los datos de biomasa se han obtenido durante el año 2011 mediante un muestreo destructivo estratificado, cuyo procedimiento consta en primer lugar de trabajos de campo y gabinete previos al muestreo. En ellos, se seleccionan los árboles que se pretende muestrear por clases diamétricas a 1.30 m. Dicha selección se efectúa de manera proporcional a la frecuencia de diámetro normal, de manera que los árboles extraídos sean representativos del conjunto de cada parcela y tratamiento. La biomasa ha sido estimada mediante el peso seco en gramos de las ramas, el fuste y acículas y yemas, por separado, mediante un muestreo destructivo de los pies más representativos de la masa de cada parcela experimental.

En el último año de medición (2018), se han recogido datos de la altura (m) (altura total y altura de inicio de la copa viva), diámetros (cm) (diámetro de base, diámetro a 1,30 m, diámetro de copa 1, diámetro de copa 2, diámetro de copa promedio), espesor de la corteza (espesor de la base, espesor a 1,30 m), número de piñas en fuste en cada pie por años (2017, 2016, 2015, 2014, 2013, 2012, 2011, 2010, 2009 y 2008) y número de piñas en rama en cada pie por años (2016, 2015, 2014, 2013, 2012, 2011, 2009, 2007).

3.5 Tratamiento estadístico

Para la adecuada interpretación de los datos, los análisis descriptivos y estadísticos se han realizado en el software R®, versión 3.6.3. La representación gráfica de estos resultados se ha elaborado mediante hojas de cálculo Excel® (Microsoft).

Teniendo en cuenta el diseño de muestreo de parcelas permanentes donde se aplican los tratamientos a lo largo del tiempo tomando medidas repetidas tanto en un mismo individuo (árbol) como en el mismo punto de muestreo (parcela), así como réplicas de cada tratamiento en distintas parcelas, y numerosas muestras (árboles) en cada una de ellas, no se cumple el supuesto de independencia de los datos de modelos lineales generales (método de mínimos cuadrados ordinarios). El diseño corresponde por tanto con un análisis estadístico de ANOVA de medidas repetidas, realizado a partir de modelos mixtos (método de mínimos cuadrados generalizados) con cada variable dasométrica a evaluar y variables aleatorias de árbol y parcela. La función utilizada en el ajuste de los modelos en R® ha sido *lmer*, presente en el paquete *lme4* (Tabla 8 Anexos).

4 RESULTADOS

En la tabla 5 se muestran los valores medios obtenidos por cada tratamiento aplicado (T, A y B) y por año. Se observa un aumento en todas las variables, así como las diferencias existentes entre tratamientos.

Todos los resultados, con excepción del diámetro a 1,30 m, el espesor de base y el espesor de corteza, son estadísticamente significativos, tanto la variación temporal (año) como el tratamiento y la interacción entre ambos en los casos correspondiente (Tabla 6).

Tabla 5. Valores medios de las variables dasométricas en función del tratamiento aplicado (T, A, B) y el año de medición. La ausencia de datos indica la falta de toma de muestras durante ese año y tratamiento.

Año	Tratamiento	Alturas			Diámetros						Espesor de corteza	
		Altura total (cm)	Altura de inicio de copa (cm)	Altura de inicio de yemas (cm)	Diámetro de base (cm)	Diámetro a 50 cm (cm)	Diámetro a 100 cm (cm)	Diámetro a 130 cm (cm)	Diámetro de inicio de copa (cm)	Diámetro de copa (cm)	Espesor de la corteza en la base (cm)	Espesor de la corteza a 130 cm (cm)
2000	T	121.16	20.01	-	3.50	2.03	-	-	2.98	87.99	-	-
	A	121.78	21.56	-	3.41	1.97	-	-	2.87	86.29	-	-
	B	119.10	21.33	-	3.28	1.83	-	-	2.83	82.42	-	-
2001	T	147.02	21.16	-	4.37	2.67	1.56	-	3.72	90.66	-	-
	A	142.42	21.60	-	4.58	2.87	1.85	-	3.83	98.38	-	-
	B	139.70	22.07	-	5.03	2.95	2.23	-	4.29	106.90	-	-
2002	T	171.55	22.62	-	5.09	3.29	2.07	-	4.37	98.82	-	-
	A	169.81	24.65	-	5.52	3.92	2.65	-	4.66	107.05	-	-
	B	168.73	22.60	-	6.48	4.44	2.88	-	5.72	133.28	-	-
2003	T	196.35	30.37	-	5.93	4.11	2.90	-	4.83	110.42	-	-
	A	198.24	27.96	-	6.87	4.88	3.70	-	5.64	128.84	-	-
	B	200.95	23.26	-	7.92	4.16	4.16	-	6.92	153.64	-	-
2004	T	230.32	37.48	349.46	7.53	4.87	3.81	-	5.68	124.32	-	-
	A	238.92	34.08	313.63	8.23	5.94	4.58	-	6.77	147.28	-	-
	B	253.31	23.30	253.31	10.16	7.52	5.33	-	8.87	173.99	-	-
2005	T	267.23	37.16	253.60	7.80	5.58	4.26	-	5.86	124.75	-	-
	A	282.56	24.73	288.85	9.15	6.86	5.34	-	7.47	150.97	-	-
	B	303.59	14.55	290.88	11.30	8.58	6.33	-	9.87	177.97	-	-
2010	T	565.15	190.44	-	12.56	-	-	7.44	-	154.29	-	-
	A	588.71	165.81	-	14.35	-	-	9.52	-	190.78	-	-
	B	613.01	150.46	-	17.37	-	-	11.68	-	234.01	-	-
2018	T	676.06	393.27	-	13.88	-	-	9.63	-	163.80	2.70	1.24
	A	739.73	383.86	-	18.19	-	-	13.52	-	253.87	2.56	1.37
	B	770.33	372.69	-	21.26	-	-	15.54	-	683.01	2.85	1.50

Tabla 6. Resultados del análisis estadístico (ANOVA).

Variable		Chisq	Df	Pr(>Chisq)
Altura total	Año	2786.8792	7	< 2.2e-16 ***
	Tratamiento	7.6864	2	0.0214253 *
	Año:Tratamiento	42.0315	14	0.0001222 ***
Altura de inicio de copa	Año	1008.9	7	< 2.2e-16 ***
Altura de inicio de yemas	Año	363.06	1	< 2.2e-16 ***
	Tratamiento	392.75	2	< 2.2e-16 ***
Diámetro de inicio de copa	Año	1968.34	5	< 2.2e-16 ***
	Tratamiento	376.15	2	< 2.2e-16 ***
	Año:Tratamiento	240.77	10	< 2.2e-16 ***
Diámetro de base	Año	4846.45	7	< 2.2e-16 ***
	Tratamiento	268.72	2	< 2.2e-16 ***
	Año:Tratamiento	199.96	14	< 2.2e-16 ***
Diámetro a 50 cm	Año	2176.95	5	< 2.2e-16 ***
	Tratamiento	225.05	2	< 2.2e-16 ***
	Año:Tratamiento	161.23	10	< 2.2e-16 ***
Diámetro a 100 cm	Año	804.6989	4	< 2.2e-16 ***
	Tratamiento	6.4025	2	0.040711 *
	Año:Tratamiento	25.4718	8	0.001293 **
Diámetro a 130 cm	Año	0.3359	1	0.5622
Diámetro de copa	Año	3777.38	7	< 2.2e-16 ***
	Tratamiento	665.29	2	< 2.2e-16 ***
	Año:Tratamiento	439.69	14	< 2.2e-16 ***
Espesor de corteza en la base	Tratamiento	1.6627	2	0.4355
Espesor de corteza a 130 cm	Tratamiento (Árbol como efecto aleatorio)	9.5559	2	0.008413 **
	Tratamiento (Parcela como efecto aleatorio)	2.2054	2	0.332

4.1 Evolución temporal de variables dasométricas

Se ha calculado el valor promedio que presenta cada variable en función de cada tratamiento, así como su evolución temporal desde el inicio del experimento hasta el año 2018. Asimismo, se han estudiado algunos índices selvícolas como la razón de copa y la esbeltez, con el objetivo de obtener una mayor información de las características de la masa hasta el año 2018.

De manera general se observa un aumento en los valores de cada parámetro a lo largo del tiempo, así como diferencias entre los tratamientos intenso (A) y muy intenso (B) frente a las parcelas sin tratar (T).

4.1.1 Alturas

4.1.1.1 Altura total

La altura total es un parámetro que en condiciones normales presenta un aumento con el paso del tiempo. En el caso del crecimiento de masas de pinar regeneradas tras incendios, la mejora de las condiciones de competencia intraespecífica como puede ser la aplicación de clareos da lugar a un adecuado crecimiento de los pies. La variación temporal de la biomasa en función del tratamiento aplicado (Figura 4 y 5) es similar entre tratamientos durante los primeros años y se va diferenciando con el paso del tiempo.

Se observa una altura similar durante los primeros años en los que se aplicaron los tratamientos, con un promedio de 120 cm en todas las parcelas, y se observan mayores diferencias a partir del año 2004. En el año 2018, la diferencia de altura entre las parcelas donde se aplicaron tratamientos diferentes fue significativa. La mayor altura total se observa en las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento más intenso (tratamiento B), siendo menor en las parcelas testigo (T<A<B). En este último año de medición, los tratamientos T, A y B presentan una altura total promedio de 676,06, 739,73 y 770,326, respectivamente. Entre A y T existen diferencias promedio de 64 cm; entre B y T, 94 cm; y entre A y B, 30 cm aproximadamente, de tal forma que se observan diferencias significativas entre los tratamientos A y T, y entre B y T, no mostrándose, en cambio, diferencias entre los dos tratamientos principales A y B.

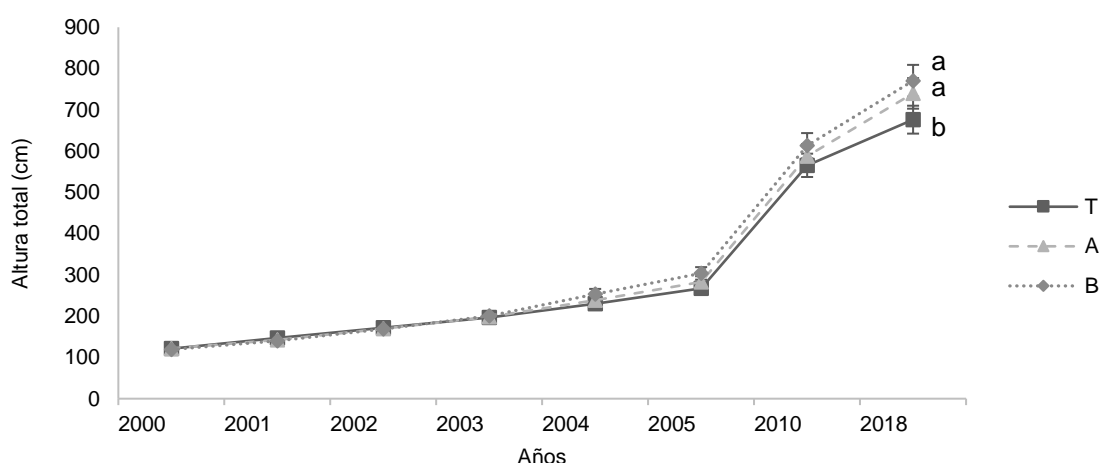


Figura 4. Evolución de la altura del árbol entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

4.1.1.2 Altura de inicio de copa viva

En el año 2000, la altura de inicio de copa presentaba valores de 20, 22 y 21 cm en T, A y B, respectivamente. En cambio, se aprecia un descenso durante los años 2004 y 2005, donde se comienzan a observar diferencias entre parcelas. A partir del año 2005 se observa un aumento de esta altura y en 2018 estos valores se sitúan en 393,27 cm (T), 383,86 cm (A) y 372,69 cm (B), es mayor cuanto menos intenso es el tratamiento.

Al igual que la altura total, la altura de inicio de la copa viva se mantiene similar durante los primeros años. En este caso, es mayor en las parcelas testigo, seguido por el tratamiento A. Las parcelas con el tratamiento B presentan una menor altura de inicio de la copa viva. En cambio, estas diferencias no son significativas.

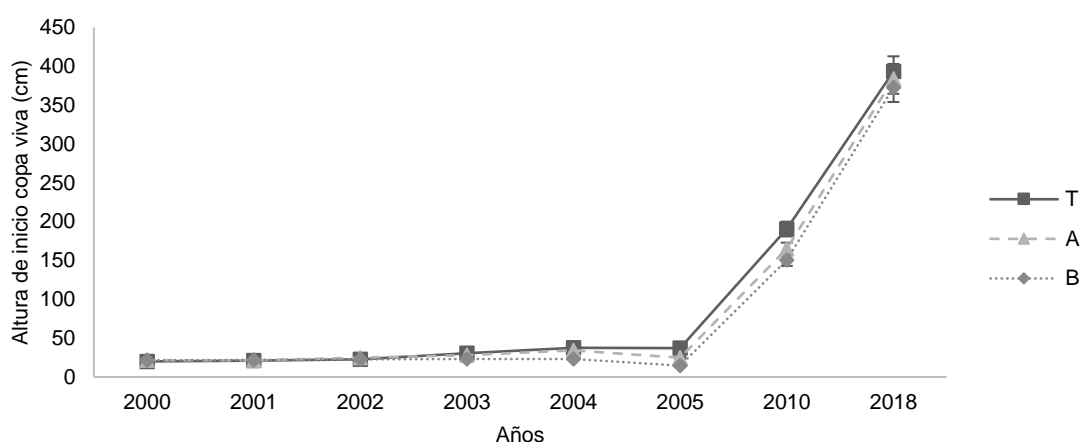


Figura 5. Evolución de la altura de inicio de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso).

4.1.2 Diámetros del fuste

Dentro de los diámetros del fuste se incluyen el diámetro de base, diámetro a 50, 100 y 130 cm y el diámetro de inicio de copa.

4.1.2.1 Diámetro de base

El diámetro de base comienza en un punto en común en todas las parcelas de estudio, alrededor de 3 cm, mientras que aumenta progresivamente hasta alcanzar como valor promedio, 13.9, 18.2 y 21.3 cm en las parcelas con tratamiento T, A y B. De esta manera se concluye que el diámetro de base tiende a ser superior cuanto más intenso es el tratamiento. Sí se observan diferencias significativas entre los tratamientos A-B, A-T y B-T. Es decir, tanto entre los dos tratamientos A y B, como entre cada uno de ellos y las parcelas testigo, existen diferencias significativas estadísticamente.

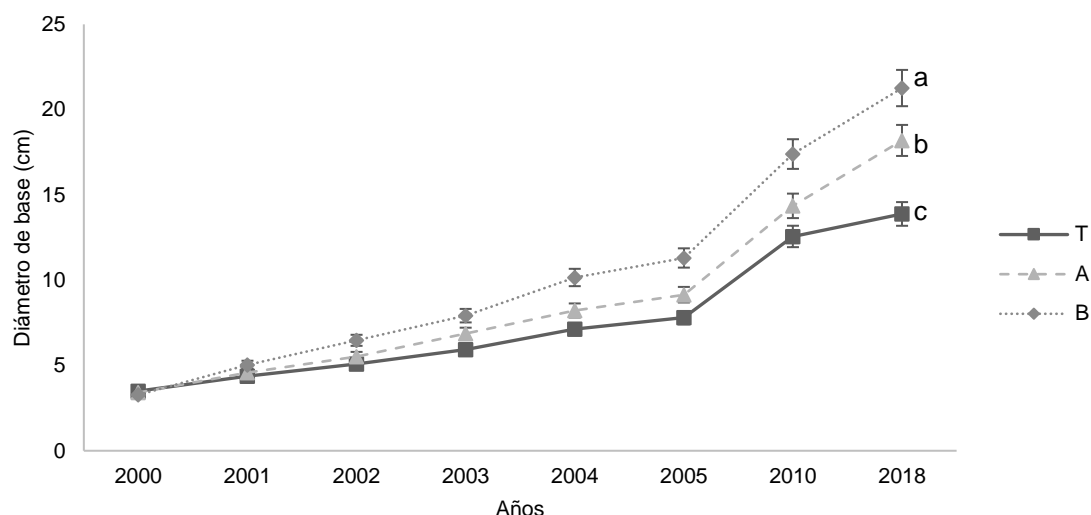


Figura 6. Evolución del diámetro en la base del fuste entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

4.1.2.2 Diámetro a 50, 100 y 130 cm

Durante los cinco primeros años se ha determinado el diámetro a 50 (Figura 7) y a 100 cm (Figura 8), de acuerdo con la altura total de los pies. En ambos casos esta sigue una tendencia creciente, con diferenciación significativa entre tratamientos, siendo superior con la mayor intensidad de los clareos.

El diámetro a 1.30 m sólo ha podido determinarse durante los dos últimos años de medición, es decir, durante los años 2010 y 2018 (Figura 9). En este caso, se observa una diferencia significativa entre tratamientos, donde el diámetro a la altura del pecho es superior en parcelas con tratamiento muy intenso en comparación con las parcelas que presentan un tratamiento intenso. A su vez las parcelas con tratamiento A presentan un mayor diámetro que las parcelas testigo. En el año 2018, este diámetro fue de 9.6 cm, 13.5 cm y 15.5 cm en T, A y B respectivamente

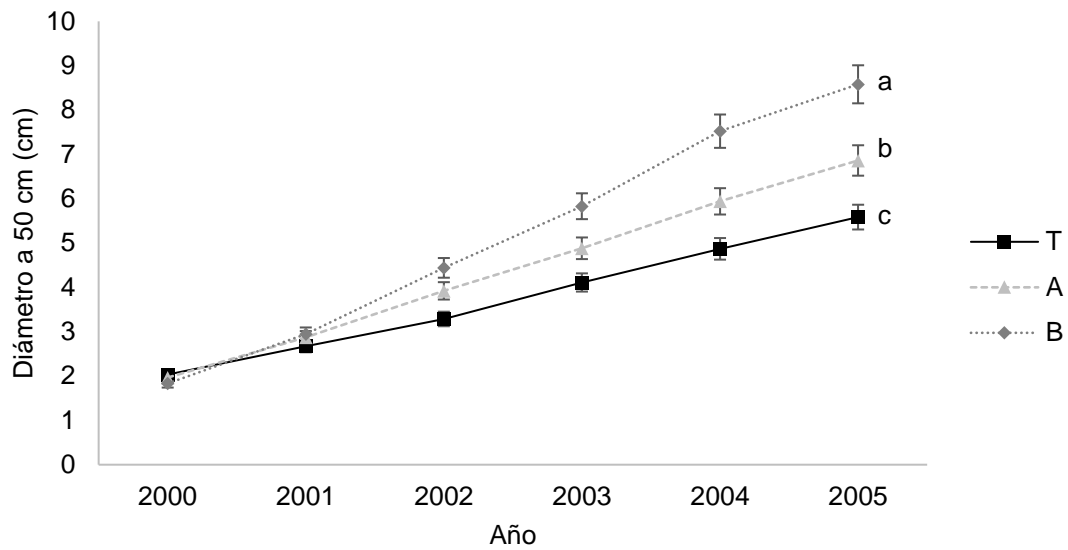


Figura 7. Evolución del diámetro medido a 50 cm de la altura del árbol entre los años 2000 y 2005 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$).

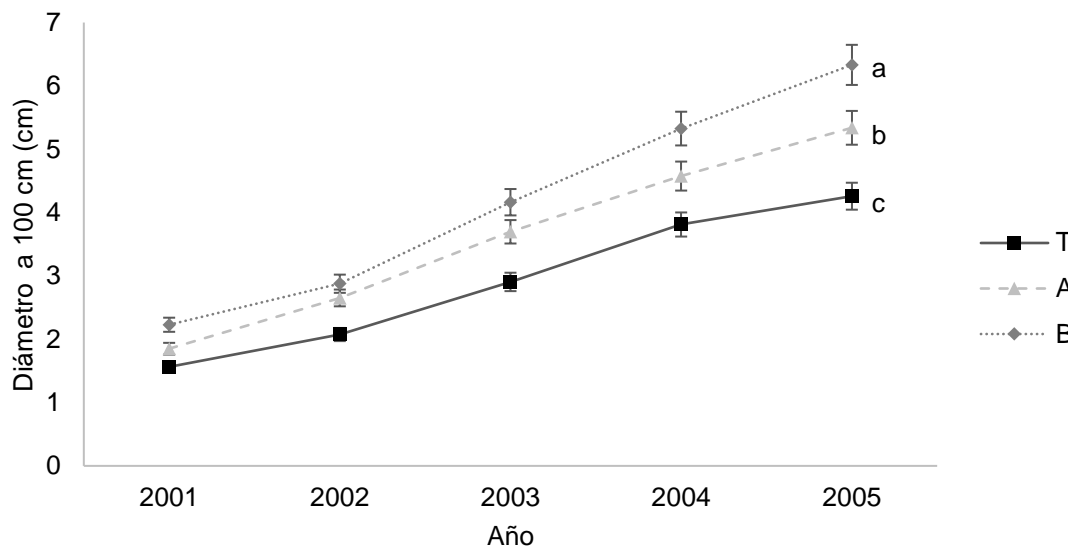


Figura 8. Evolución del diámetro medido a 100 cm de la altura del árbol entre los años 2001 y 2005 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$).

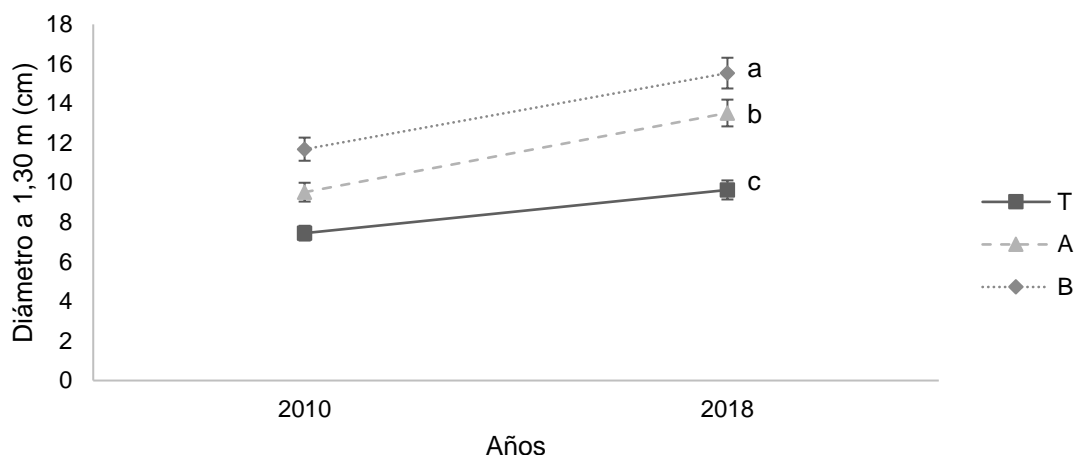


Figura 9. Evolución del diámetro medido a 130 cm de la altura del árbol de los años 2010 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$).

4.1.2.3 Diámetro de inicio de copa

El diámetro de inicio de copa viva se determinó únicamente entre los años 2000 y 2005, anualmente (Figura 10). En primer término, durante el año 2000, los valores se sitúan para los tratamientos T, A y B en 3, 2.9 y 2.8 cm respectivamente, mientras que, en el año 2018, el diámetro de inicio de copa acaba siendo ligeramente superior tras la aplicación de un tratamiento muy intenso, con valores de 5.9, 7.5 y 9.9 cm en las parcelas con tratamientos T, A y B, respectivamente. De esta manera, el diámetro de inicio de la copa también es significativamente diferente entre tratamientos, superior cuanto más intenso fue el tratamiento.

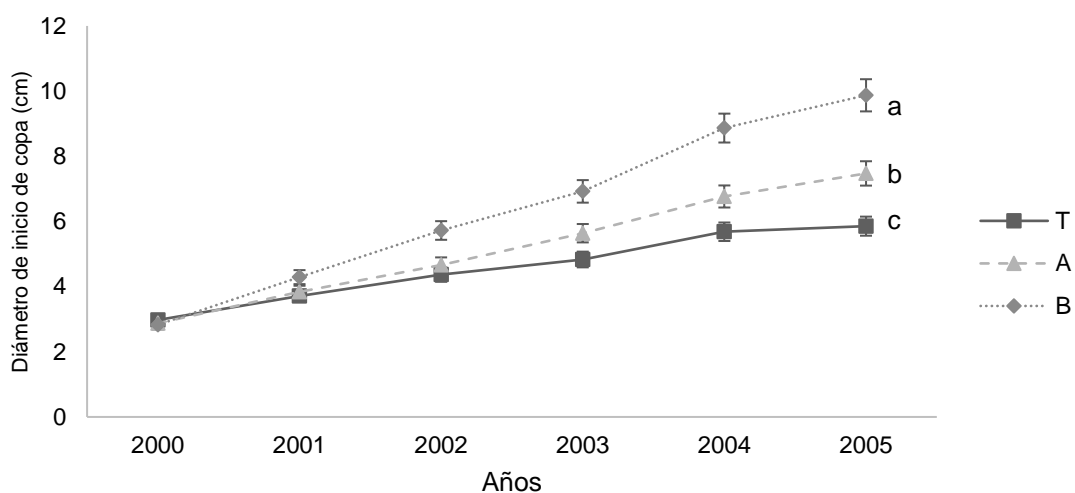


Figura 10. Evolución del diámetro de inicio de copa viva entre los años 2000 y 2005 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$).

4.1.3 Diámetro de copa

Desde los primeros años se ha observado una diferencia entre tratamientos, siendo significativamente superior en las parcelas donde se ha aplicado el tratamiento B (Figura 11).

La diferencia entre tratamientos es más notable que para las variables anteriormente mencionadas, comenzando con un diámetro promedio de 88, 86 y 82 cm para los tratamientos T, A y B. Este diámetro es significativamente superior cuanto más intenso fue el tratamiento aplicado en las parcelas, es decir, es significativamente superior en las parcelas con tratamiento B que A, así como superior que en las parcelas testigo. En el año 2018 el diámetro de copa fue de 163, 254,4 y 294,7 cm, respectivamente.

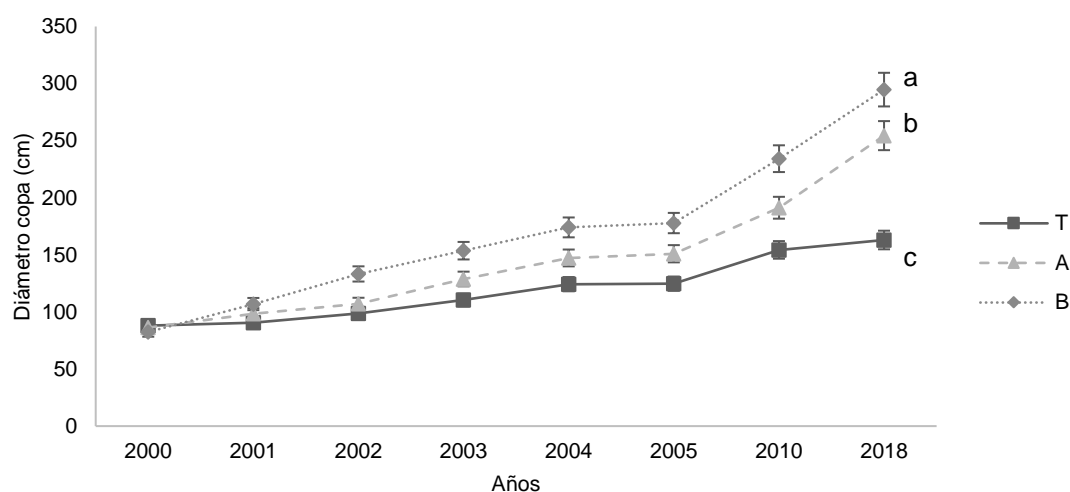


Figura 11. Evolución del diámetro de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso). Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0.05$).

4.1.4 Espesor de corteza

El espesor de corteza presenta tendencias diferentes ya sea medido en la base o a 1.30 m (Figura 12). En la base, no se observa una tendencia clara en contraste con las parcelas testigo. En cambio, cuando este parámetro se mide a una altura de 1.30 m sí se observa una tendencia significativa creciente que indica que el espesor es mayor cuanto más intenso es el tratamiento.

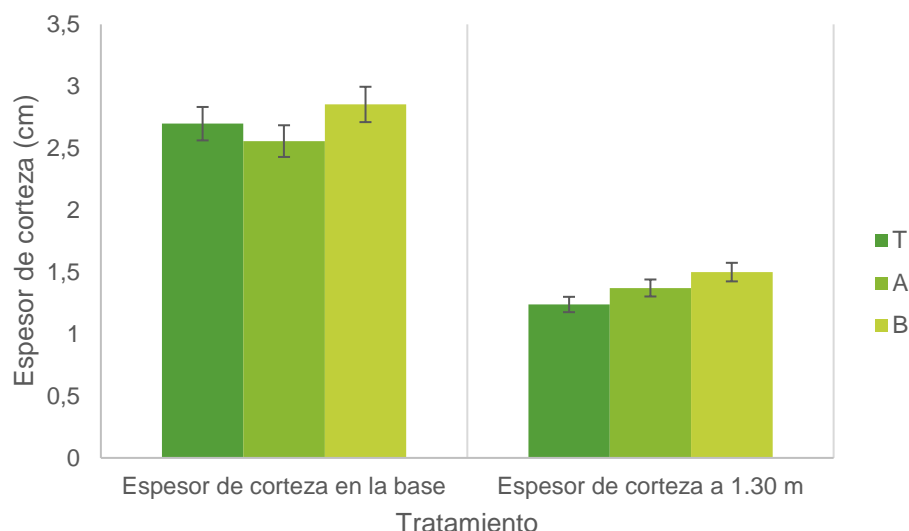


Figura 12. Evolución del espesor de corteza en la base y a 1.30 m en el año 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso).

4.2 Índices selvícolas

4.2.1 Razón de copa

La razón de copa se situó el primer año alrededor del 80% en todas las parcelas estudiadas, presentando una mayor diferencia entre tratamientos a partir del año 2003 (Figura 13). Entre 2003 y 2005, el porcentaje medio de razón de copa aumentó ligeramente (T: 85.94, A: 91.26, B: 95.08, en 2005). A partir de 2005 la razón de copa disminuye, obteniéndose valores de 66,20, 72,07 y 75,38 en 2010, y valores de 41,23, 47,80 y 51,97 en el año 2018 para los tratamientos T, A y B, respectivamente.

Las parcelas donde se han aplicado los clareos ya sean intensos o muy intensos, presentan una mayor razón de copa que las parcelas testigo durante el último año de medición. Dentro de cada tratamiento, se observa que las parcelas con clareos más intensos presentan una razón de copa superior.

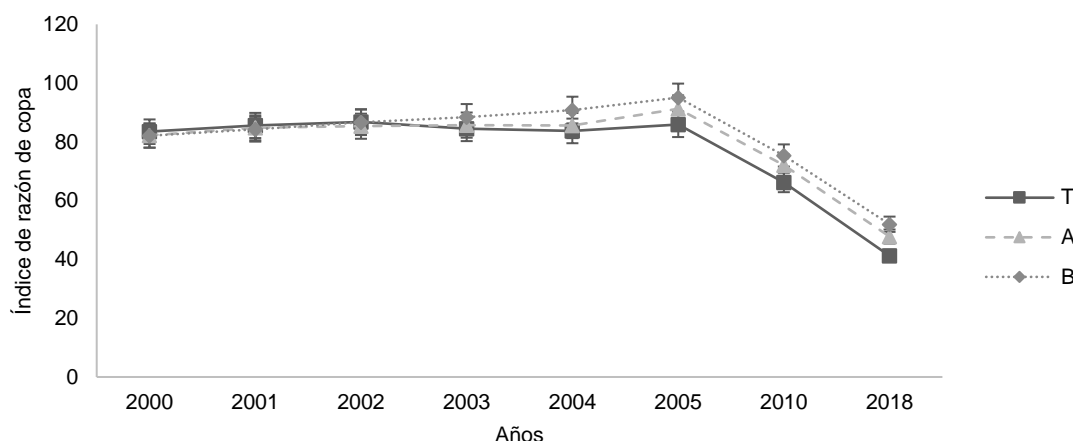


Figura 13. Evolución del índice de razón de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso).

4.2.2 Coeficiente de esbeltez

En primer término, durante el año 2000 se observa una esbeltez de 34,7, 36,0 y 36,4 para los tratamientos T, A y B respectivamente (Figura 14). Durante los años siguientes, estos se mantienen aproximadamente constantes, entre valores de 25 y 34, siendo superior en las parcelas testigo, seguido por el tratamiento A y, posteriormente el tratamiento B con una menor esbeltez.

Se observa un aumento significativo de la esbeltez durante los últimos años de medición (2010 y 2018) en comparación con años anteriores, alcanzando valores de 48,5 en el tratamiento T, 40,6 en las parcelas con clareos intensos, y 36,2 en las parcelas tratadas con clareos muy intensos. De este modo, se observan significativamente mayores valores de esbeltez en las parcelas testigo que en las parcelas donde se ha aplicado algún tratamiento selvícola, siendo la esbeltez menor cuanto más intenso es el tratamiento.

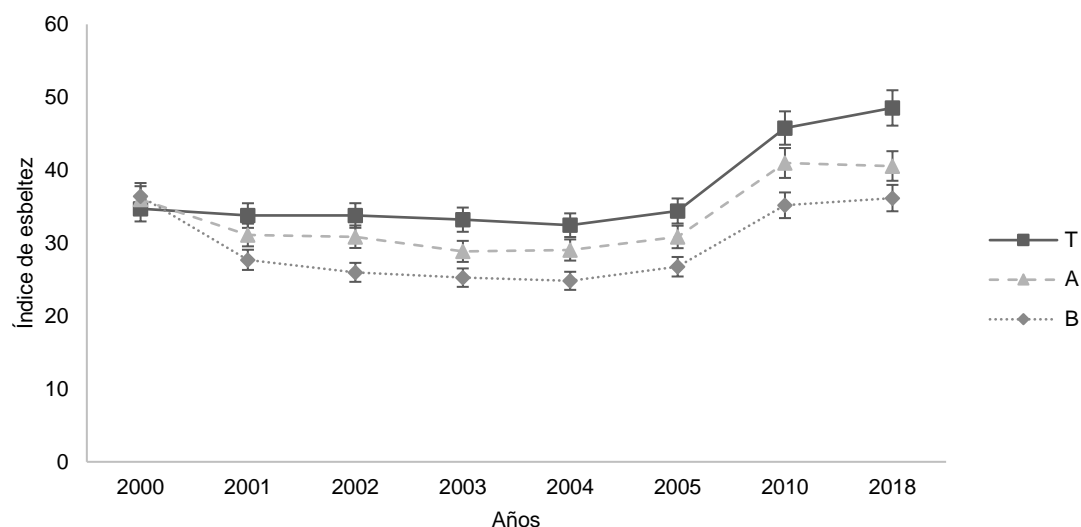


Figura 14. Evolución del índice de esbeltez entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso).

4.3 Biomasa

Se han detectado diferencias significativas entre parcelas para las diferentes fracciones de biomasa estudiadas (Figura 15). Pese a que, tanto en el caso de ramas, fuste y acículas y yemas, existen diferencias entre cada parcela y cada réplica de cada tratamiento, se observa una tendencia creciente. Es decir, cuanto más intenso es el tratamiento aplicado en la masa, los pies individuales presentan una mayor biomasa en los tres casos (ramas, fuste y acículas y yemas).

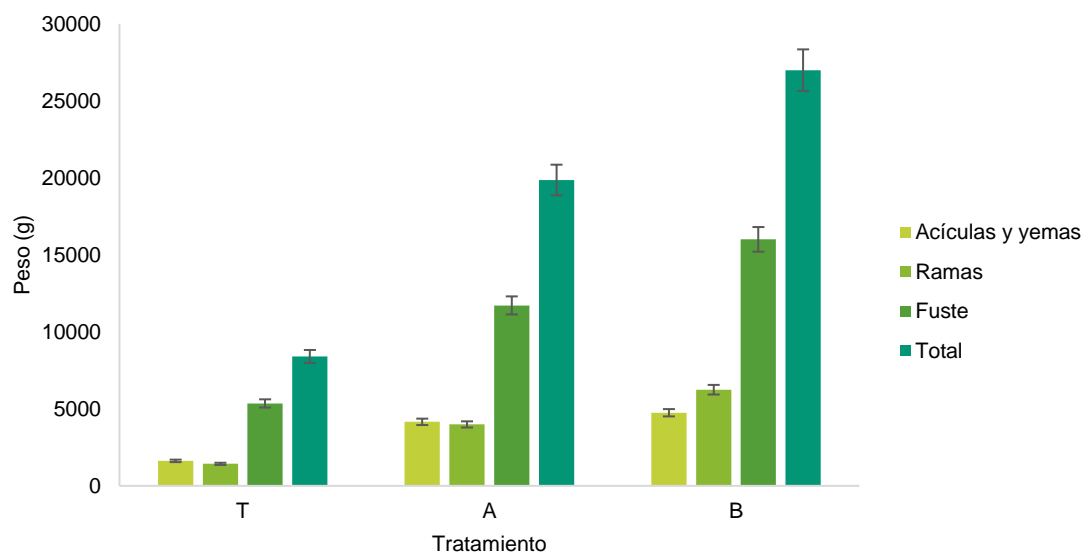


Figura 15. Biomasa de las acículas y yemas, ramas, fuste y total, del año 2011 según el tratamiento aplicado. Se observan diferencias entre los tratamientos de clareo A y B y las parcelas testigo (T).

Se ha estimado la biomasa por parcela (Figura 16), teniendo en cuenta la diferencia en el número de pies por parcela es superior en el caso de las parcelas donde ha sido aplicado un tratamiento B (70 pies por parcela) en contraste con aquellas con un tratamiento T o A (56 pies por parcela). De esta manera se observa una mayor biomasa en las parcelas donde el clareo ha sido intenso (A) en comparación con el tratamiento T. En cambio, considerando un menor número de pies por hectárea en el caso del tratamiento B, la biomasa estimada resulta ser inferior que en el caso de las parcelas testigo.

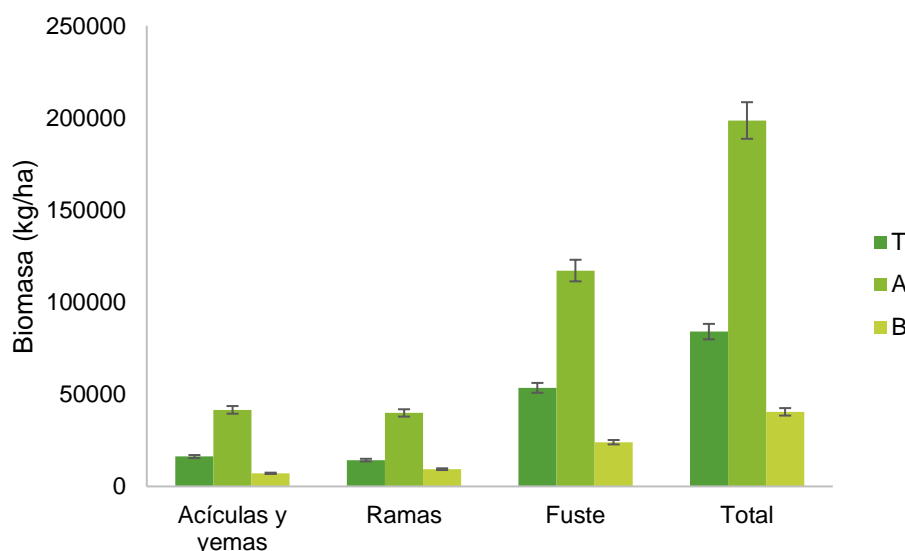


Figura 16. Biomasa media por parcela en acículas y yemas, ramas, fuste y biomasa total según el tratamiento aplicado (T, A, B). Letras diferentes muestran diferencias significativas.

4.4 Fructificación

Se ha determinado la presencia de piñas en la medición de 2018, diferenciando el número de piñas presentes en los pies de cada año, las piñas presentes en el fuste y en las ramas.

El promedio de piñas varía en cada tratamiento (Figura 17), así como en el año y ubicación de las piñas. Por lo general, considerando todas las edades (piñas de todos los años), existe un mayor número de piñas promedio en las parcelas tratadas con clareos, siendo mayor cuanto más intenso es el tratamiento aplicado. En las parcelas con tratamiento B, alrededor de un 45% de los árboles presentan piñas en el fuste de los años 2015 y 2016. Existe una mayor cantidad de piñas procedentes del fuste, en contraste con las piñas de las ramas, con unos valores inferiores.

El número máximo de piñas que pueden encontrarse en cada árbol se sitúa en torno a las 2 piñas por pie durante el último año de medición (Figura 19). En las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento más intenso existe un mayor número de piñas. Igualmente, las parcela con tratamiento A presentan un mayor número de piñas que las parcelas control.

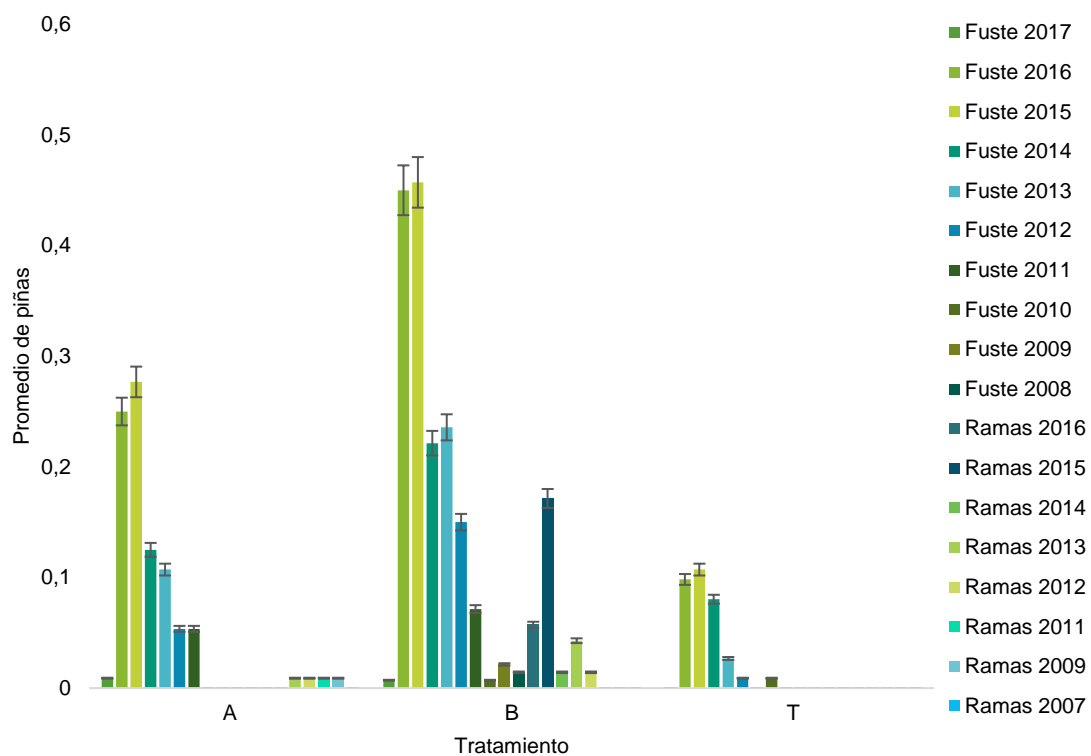


Figura 17. Promedio de piñas por parcela en cada tratamiento. Se observan diferencias entre los tratamientos de clareo A y B y las parcelas testigo (T).

De igual manera que ocurre al calcular la biomasa en función del número de pies por hectárea en función del tratamiento, las diferencias en relación con el número de piñas promedio en las parcelas con tratamiento B no han resultado tan significativas tras su comparación con las parcelas testigo (Figura 18).

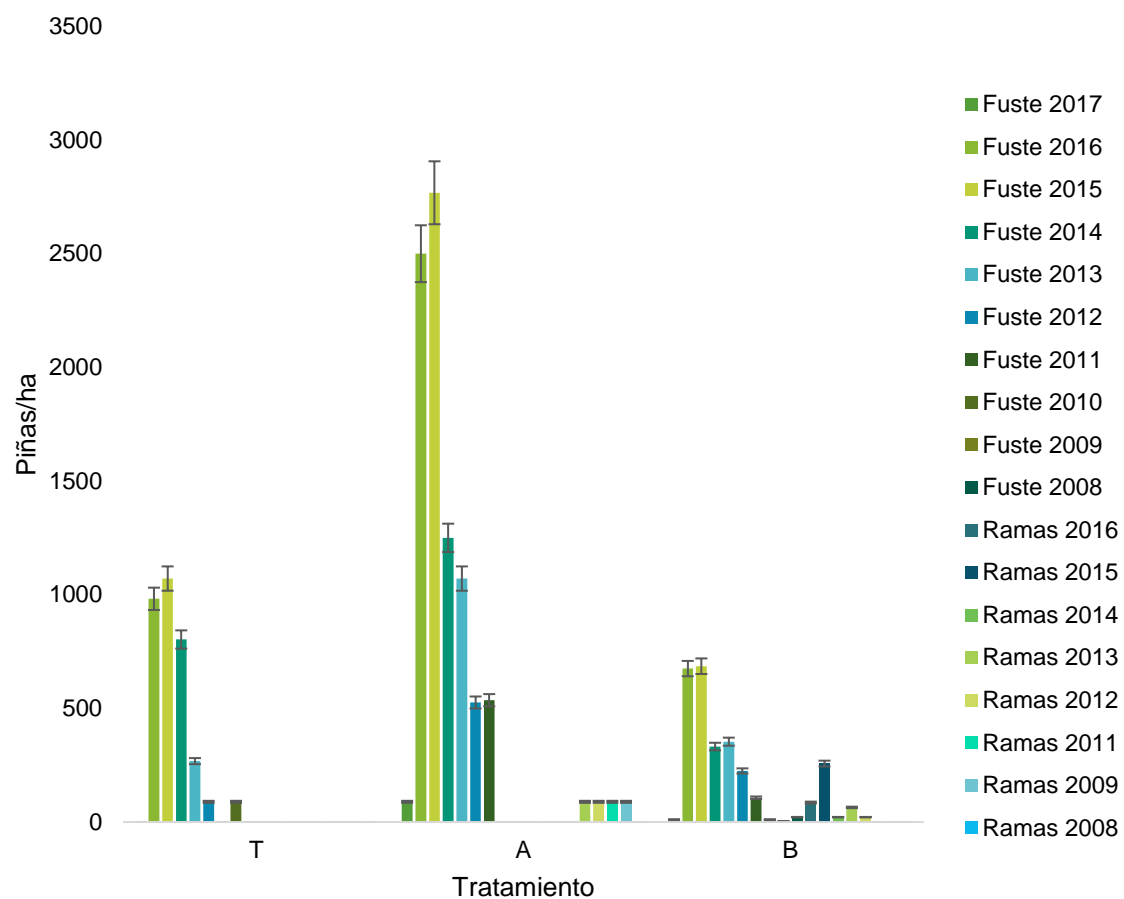


Figura 18. Banco aéreo (piñas/ha) en función del tratamiento (T, A, B) y el año de producción de las piñas.

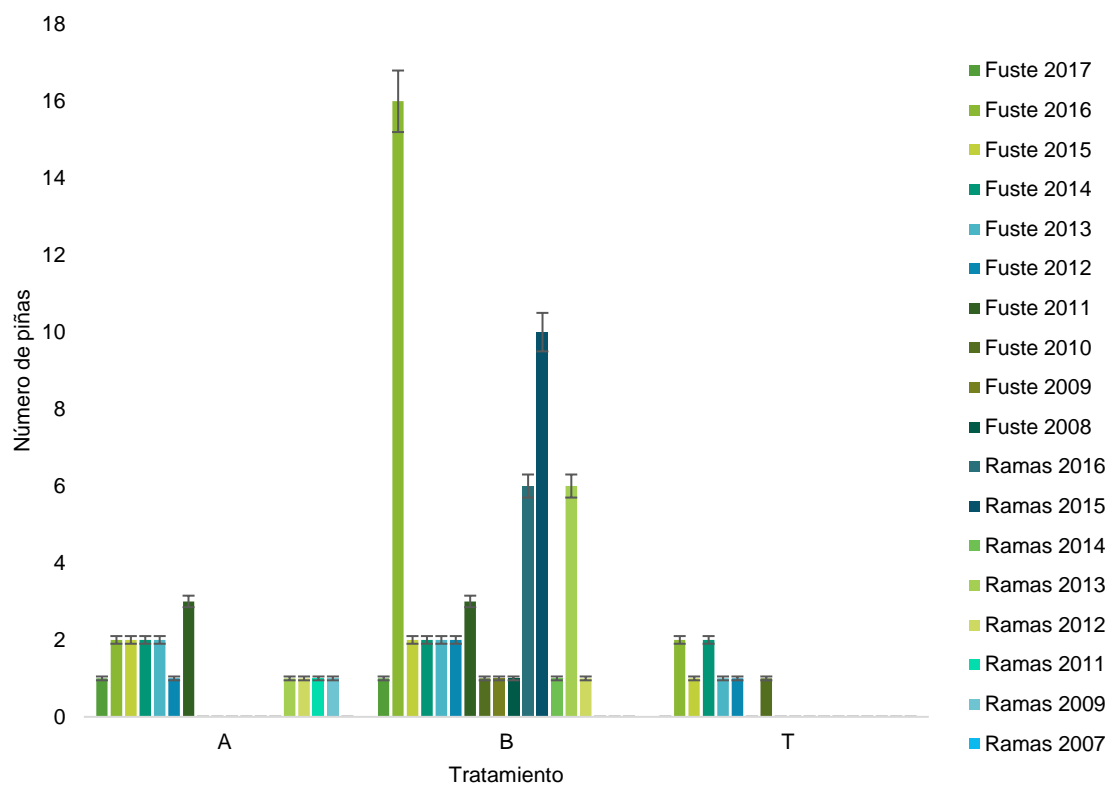


Figura 19. Número máximo de piñas presentes en cada parcela por años. Se observan diferencias entre los tratamientos de clareo A y B y las parcelas testigo (T).

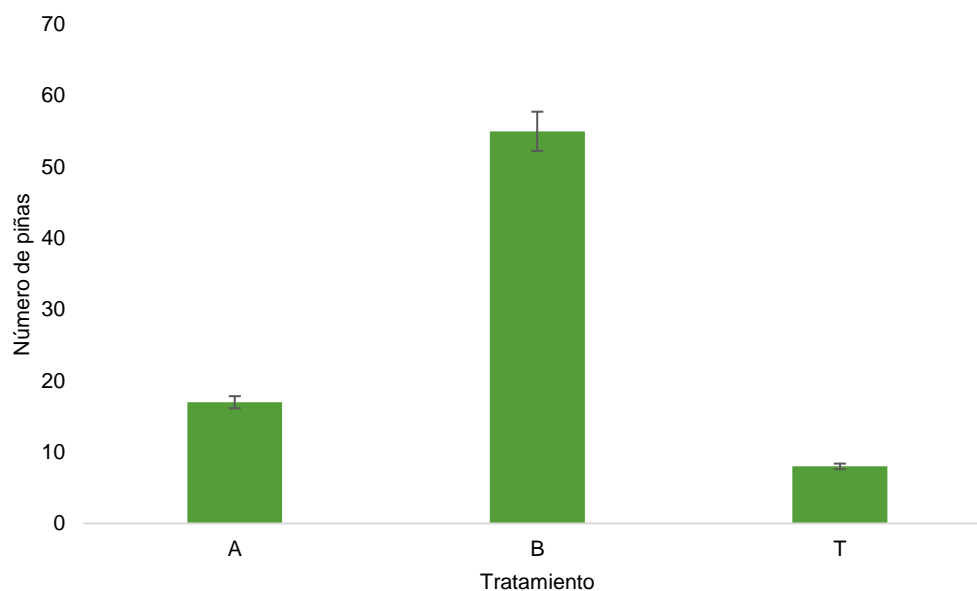


Figura 20. Número máximo de piñas por parcela, en total. Se observan diferencias entre los tratamientos de clareo A y B y las parcelas testigo (T).

5 DISCUSIÓN

Existen diferencias significativas entre los dos tratamientos estudiados (A y B) y las parcelas testigo en prácticamente todos los parámetros estudiados, con impactos en el rodal.

La única variable que ha resultado beneficiosa de la no actuación (testigo) fue el aumento de la altura de inicio de copa, que implicaría una menor probabilidad teórica de subida del fuego a las copas, así como una lógica reducción de costes debido al uso de la restauración pasiva del rodal. En cambio, la ausencia de clareos tempranos en masas de *Pinus pinaster* regeneradas de manera natural tras incendios dan lugar a una elevada densidad y espesura. A medio y largo plazo, la no actuación está dando lugar a un rodal de menor calidad ecológica y selvícola, como se ha observado también en estudios de otras zonas en Reino Unido (Cameron, 2002), implicando una mayor esbeltez de los pies y un menor desarrollo en términos de altura, diámetro, espesor de corteza, biomasa y fructificación. La mayor densidad implica además un empeoramiento de la estabilidad de la masa, mayor esbeltez de los pies y mayor competencia intraespecífica.

En cuanto a la elección del tratamiento, en este estudio se ha valorado la posibilidad de aplicar tratamientos selvícolas en estas masas, ya sean de carácter intensos (a) o muy intensos (b). Ambos presentan mejoría respecto a las parcelas testigo, mostrando mejores características selvícolas de los pies cuanto más intenso es éste.

El tratamiento A constituye una buena alternativa frente al regenerado originado tras incendios en comparación con la no actuación. En cambio, los resultados en relación con el crecimiento (altura, diámetro, biomasa), resistencia (espesor de corteza) y resiliencia (fructificación) son menores que los resultados obtenidos tras clareos muy intensos. Debido a la menor intensidad que el tratamiento B, hay una reducción de los costes.

El tratamiento B, de carácter muy intenso, ha demostrado obtener mejores resultados en todos los aspectos evaluados con excepción de la altura de inicio de copa que podría implicar un mayor riesgo de subida del fuego a copas en caso de incendio.

El análisis de diferentes variables dasométricas ha resultado en cambios significativos desde los primeros años de estudio en la altura, diámetro y biomasa de los pies tras la aplicación de clareos intensos y muy intensos en las parcelas de estudio, como también ha sido estudiado por Madrigal et al. 2006, previamente. Entre las dos intensidades estudiadas, los clareos de carácter muy intenso (B) han ocasionado un crecimiento mayor en estas tres variables que los clareos intensos (A). La eliminación de pies realizada mediante tratamientos de clareo conlleva una reducción de la densidad del rodal y un mayor espaciado de los árboles en cada parcela (Rodríguez et al., 2008), logrando disminuir la competencia intraespecífica. Esto junto con la mayor disponibilidad de luz solar hace posible el crecimiento longitudinal, es decir, el crecimiento en diámetro, un mayor espesor de corteza y una mayor producción de resina. Dentro del crecimiento en diámetro

destaca el diámetro de copa, cuyo desarrollo permite una mayor fructificación y un aumento de la resiliencia futura frente a incendios o la menos mayor capacidad de persistencia.

La estructura vertical de los pies se ha visto modificada tras los clareos realizados, lo cual afecta a aspectos como la esbeltez o la altura de inicio de la copa viva. La mayor altura en conjunción con el mayor crecimiento en diámetro se ha traducido en pies con una menor esbeltez tras la aplicación de clareos en comparación con las parcelas testigo. De este modo, se ha visto una mejoría en la estabilidad de los árboles y del rodal. Tratamientos de clareo muy intenso (B), así como tratamientos intensos (A) permiten el desarrollo de masas más estables frente a agentes físicos y climáticos, como el viento o la nieve, así como una mejor calidad selvícola al aumentar la rectitud y estabilidad del porte.

La altura de inicio de copa se ha visto modificada, siendo mayor en las parcelas testigo, siendo las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento B las que presentan una altura de inicio de copa más baja. La mayor altura de inicio de copa viva en las parcelas testigo se debe a la mayor espesura presente en la masa y la menor incidencia de radiación solar, lo cual ocasiona la muerte de las ramas más bajas. Respecto a esta variable, la masa presenta una mayor susceptibilidad a los incendios de copa.

La aplicación de un tratamiento de carácter muy intenso tiene efectos positivos en el espesor de corteza, tanto en la base del fuste como a una altura de 1.30 metros, en contraste con el espesor de corteza que presentan los pies presentes en parcelas testigo o a los que se les ha aplicado un tratamiento A. El mayor espesor de corteza que presentan los pies clareos muy intensos (B), indica un aumento de la resistencia del rodal frente a nuevos incendios. Este resultado es novedoso y no se han encontrado referencias al respecto, lo que sugiere seguir investigando en esta línea.

La prevención de subida del fuego a la copa no se ha visto mejorada, como consecuencia de la menor altura de inicio de copa, lo cual permite un más rápido ascenso del fuego. En cambio, la menor biomasa de acículas a escala de rodal (menor densidad) haría necesario un fuego más intenso de superficie para generar un fuego activo de copas, al disminuir la continuidad de la masa (Fernández-Alonso et al. 2013, Jiménez et al. 2013). Además, se produce una mejora teórica de la resistencia del rodal mediante el aumento del espesor de la corteza. En conjunto las parcelas tratadas reducen por tanto la vulnerabilidad frente a nuevos incendios.

A modo de conclusión, la aplicación de clareos tempranos de carácter muy intenso en masas de *Pinus pinaster* de elevada densidad regeneradas tras incendios han mostrado un impacto positivo en la mejora de la masa, desarrollo, crecimiento y vulnerabilidad frente a nuevos incendios forestales. Las características del rodal mejoran a medio y largo plazo, obteniendo una masa más estable, resistente y resiliente frente a nuevos incendios. Puede verse como una inversión a largo plazo en la calidad futura de la masa, así como en su valor, sin verse comprometida la estabilidad. Además, los clareos tempranos permitirían masas de mejor calidad selvícola en masas con fines comerciales.

6 CONCLUSIONES

- La aplicación de claros tempranos en masas de *Pinus pinaster* con una intensa densidad de regenerado tras incendios, con riesgo de presentar problemas en la masa en términos de desarrollo, viabilidad y estabilidad, ayudan a un mejor desarrollo de la masa a corto, medio y largo plazo.
- Las mayores intensidades de claro (tratamiento B) presentan mejores resultados en la masa en comparación con tratamientos intensos (A) y frente a las parcelas testigo (T).
- La aplicación de claros tempranos presenta impactos positivos en la altura, diámetro y biomasa.
- La esbeltez se ve reducida en las parcelas donde se han aplicado tratamientos más intensos, aumentando la estabilidad de la masa.
- La vulnerabilidad frente a nuevos incendios se reduce tras la aplicación de claros, al desarrollarse pies con un mayor espesor de corteza (resistencia) y con una mayor fructificación (resiliencia).

7 AGRADECIMIENTOS

Muestro mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que directa o indirectamente han hecho posible la realización de este trabajo.

En primer término, a los trabajadores de la empresa donde he realizado las prácticas asociadas al mismo (CIFOR-INIA), por la magnífica acogida recibida durante mi corta estancia presencial en las instalaciones y por haberme hecho estar cómoda desde el primer minuto mientras ampliaba mis conocimientos sobre el tema.

Presento un especial agradecimiento al director de este Trabajo de Fin de Máster, Javier Madrigal Olmo, por prestar su apoyo y ayuda.

Por último, a mi familia, por mostrarme su apoyo y estar conmigo en los momentos más difíciles.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Allué Andrade, J.L., 1990. Atlas Fitoclimático de España. Taxonomías. INIA. Ministerio de Agricultura, Madrid. 221 00. + 8 planos.
- Bannister, J.R., Donoso, P.J., Mujica, R. 2016. La silvicultura como herramienta para la restauración de bosques templados. *Bosque* (Valdivia), 37(2), 229-235. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002016000200001>
- Beer, T., Gill, A.M., Moore, P.H.R. 1988. Australian bushfire danger under changing climate regimes. In: Pearman GI (ed) *Greenhouse: planning for climate change*. CSIRO, Melbourne.
- Bengtsson J., Nilsson S.G., Franc A., Menozzi P. 2000. Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. *Forest Ecology and Management* 132: 39-50.
- Brotons, L., Aquilué, N., de Cáceres, M., Fortin, M-J., Fall, A. 2013. How Fire History, Fire Suppression Practices and Climate Change Affect Wildfire Regimes in Mediterranean Landscapes. *PLoS ONE* 8(5): e62392. doi:10.1371/journal.pone.0062392
- Budde, K.B., Heuertz, M., Hernández-Serrano, A., Pausas, J.G., Vendramin, G.G., Verdú, M., González-Martínez, S.C. 2014. In situ genetic association for serotiny, a fire-related trait, in Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster*). *New Phytologist*. 201: 230–241. doi: 10.1111/nph.12483
- Buhk C., Götzenberger L., Wesche K., Sánchez Gómez P., Hensen I. 2006 - Post-fire regeneration in a Mediterranean pine forest with historically low fire frequency. *Acta Oecologica* 30: 288-298.
- Calvo, L., Hernández, V., Valbuena, L., Taboada, A. 2016. Provenance and seed mass determine seed tolerance to high temperatures associated to forest fires in *Pinus pinaster*. *Annals of Forest Science* 73:381-391.
- Calvo, L., Santalla, S., Marcos, E., Valbuena, L., Tárrega, R., Luís, E. 2003. Regeneration after wildfire in communities dominated by *Pinus pinaster*, an obligate seeder, and others dominated by *Quercus pyrenaica*, a typical resprouters. *Forest Ecology and Management* 184: 209-223.
- Cameron, A. D. 2002. Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry*. Vol. 75, No. 1
- Clark, J.S. 1990. Fire and climate change during the last 750 yr in northwestern Minnesota. *Ecol Monogr* 60:135–159.
- Cutino, I., Pasta, S., Maggiore, C.V., Badalamenti, E., La-Mantia, T. 2018. The role of dominant tree cover and silvicultural practices on the post-fire recovery of Mediterranean

- afforestations. *Annals of Silvicultural Research*. 42 (1): 20-31. <http://dx.doi.org/10.12899/asr-1482>.
- Fernandez, P.M., Rigolot, E. 2007. The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* 241: 1–13.
- Fernández-Alonso, J.M., Alberdi, I., Álvarez-González, J.G., Vega, J.A., Cañellas, I., Ruiz-González, A.D. 2013. Canopy fuel characteristics in relation to crown fire potential in pine stands: analysis, modelling and classification. *European Journal of Forest Research* 132: 363–377.
- García-Jiménez, R., Palmero-Iniesta, M., Espelta, J.M. 2017. Contrasting effects of fire severity on the regeneration of *Pinus halepensis* Mill. and resprouter species in recently thinned thickets. *Forests* 8 (3): 55.
- Gómez-Vázquez, I., Crecente-Campo, F., Diéguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F. 2013. Modelling canopy fuel variables in *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus radiata* D. Don stands in northwestern Spain. *Annals of Forest Science* 70: 161–172.
- González-Alday, J., Martínez-Ruiz, C., Bravo, F. 2009. Vegetación herbácea en una masa característica de *Pinus pinaster* en la región de procedencia “Meseta Castellana”: efecto de la intensidad de corta sobre la diversidad y composición florística.
- Hanes, T.L. 1971. Succession after fire in the chaparral of southern California. *Ecological Monographs* 41: 27-52.
- Herrero de Aza, C., Bravo-Oviedo, F., San Martín-Fernández, R. 2004. Modelo de probabilidad de germinación de pino negral *Pinus pinaster* Ait. tras incendio. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 18: 57-63.
- Jiménez et al. 2008-<https://academic.oup.com/forestry/article/81/4/543/528765?searchresult=1>
- Jiménez, E., Vega, J.A., Ruiz-González, A.D., Guijarro, M., Alvarez-González, J.G., Madrigal, J., Cuiñas, P., Hernando, C., Fernández-Alonso, J.M. 2013. Carbon emissions and vertical pattern of canopy fuel consumption in three *Pinus pinaster* Ait. active crown fires in Galicia (NW Spain). *Ecological Engineering* 54: 202-209.
- Keeley, J.E., Bond, W.J., Bradstock, R.A., Pausas, J.G., Rundel, P.W. 2011. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. *Trends in Plant Science* 16 (8): 406-411.
- Keeley, J.E., Bond, W.J., Bradstock, R.A., Pausas, J.G., Rundel, P.W. 2011. *Fire in Mediterranean Ecosystems: Ecology, Evolution and Management*. Cambridge University Press. New York, United States of America.
- Keeley, J.E., Zedler, P.H. 1978. Reproduction of chaparral shrubs after fire: comparison of sprouting and seeding strategies. *American Midland Naturalist* 99: 142-161.

- Lloret, F., Calvo, E., Pons, X., Díaz-Delgado, R. 2002. Wildfires and landscape patterns in the Eastern Iberian Peninsula. *Landscape Ecology* 17: 745-759.
- Madrigal et al 2017. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-016-1004-5>
- Madrigal et al. 2011. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3878980>
- Madrigal, J., Hernando, C., Guijarro, M., Jiménez, E. 2006. Distribución de biomasa y fijación de carbono tras clareos mecanizados intensos en regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. (Monte «Fraguas», Guadalajara, España). *Investigación agraria: sistemas y recursos forestales* 15(2): 231-242.
- Madrigal, J., Hernando, C., Guijarro, M., Vega, J.A. 2014. Distribución de biomasa en las copas y el matorral tras clareos mecanizados intensos de regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* Ait.: implicaciones para la prevención de incendios de copa. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 40: 123-130.
- Madrigal, J., Hernando, C., Martínez, E., Guijarro, M., Díez, C. 2005. Regeneración post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central, España): modelos descriptivos de los factores influyentes en la densidad inicial y supervivencia. *Investigación agraria: sistemas y recursos forestales* 14(1), 36-51.
- Madrigal, J., Martínez-Herranz, E., Hernando, C., Guijarro, M., Díez, C. 2004. Respuesta a Corto Plazo del Regenerado Post-Incendio de *Pinus pinaster* Ait. a Clareos Mecanizados Intensos. *Silva Lusitana* 12(1): 1 - 14, 2004
- Martínez-Chamorro, E., Rodríguez-Soalleiro, R. 2003. Clareos con desbrozadora de eje vertical sobre regeneración natural de *Pinus pinaster* Ait. en la provincia de Orense. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 15: 153-157.
- Meira-Neto, J.A.A., Clemente, A., Oliveira, G., Nunes, A., Correia, O. 2011. Post-fire and post-quarry rehabilitation succession in Mediterranean-like ecosystems: Implications for ecological restoration. *Ecological Engineering* 37 (2011) 1132–1139.
- Moriendo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., Corte-Real, J. 2006. Potential impact of climate change in fire risk in the Mediterranean area. *Climate research* Vol. 31: 85–95.
- Moya, D., De las Heras, J., Ferrandis, P., Herranz, J.M., Martínez-Sánchez, J.J. 2011. Fire resilience and forest restoration in Mediterranean fire-prone areas. *Technology and Knowledge Transfer e-Bulletin, Universidad Politécnica de Cartagena* 2 (3): 1-5.
- Muscolo, A., Settineri, G., Bagnato, S., Mercurio, R., Sidari, M. 2017. Use of canopy gap openings to restore coniferous stands in Mediterranean environment. *iForest* 10: 322-327. doi: 10.3832/ifor1983-009
- Nyland, R. D. 2016. *Silviculture: concepts and applications*. Waveland Press.

- O'Hara KL. 2001. The silviculture of transformation - a commentary. *Forest Ecology and Management* 151: 81-86.
- Oliveira, S., Oehler, F., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A., Pereira, J.M.C. 2012. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. *Forest Ecology and Management* 275: 117-129.
- Pausas, J.G., Llovet, J., Rodrigo, A., Vallejo, R. 2008. Are wildfire a disaster in the Mediterranean basin? - A review. *International Journal of Wildland Fire* 17: 713-723.
- Rodríguez, R. J., Serrada, R., Lucas, J. A., Alejano, R., Del Río, M., Torres, E., & Cantero, A. 2008. *Selvicultura de Pinus pinaster Ait. subsp. Mesogeensis fieschi & gausson. Compendio de selvicultura aplicada en España*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid, 399-430.
- Sánchez-Palomares, O., Sánchez-Serrano, F. 2000. Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España. Cartografía digital, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, MMA, Madrid.
- Sarr D, K Puettmann, R Pabst, M Cornett, L Arguello. 2004. Restoration Ecology: New Perspectives and Opportunities for Forestry. *Journal of Forestry* 102:20-24.
- Serrada, R. 2003. Regeneración natural: situaciones, concepto, factores y evaluación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 15: 11-15.
- Serrada, R. Apuntes de selvicultura. 2011. Fundación conde del valle de Salazar.
- Soalleiro, R. J. R., Hierro, R. S., Santolaya, J. A. L., Monje, R. A., del Río Gaztelurrutia, M., Álvarez, E. T., Amiano, A. C. *Selvicultura de Pinus pinaster subesp. Mesogeensis*.
- Stanturf JA, BJ Palik, RK Dumroese, 2014. Contemporary forest restoration: A review emphasizing function. *Forest Ecology and Management* 331:292-323. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.07.029
- Trabaud L., Galtié J.-F. 1996 - Effects of fire frequency on plant communities and landscape pattern in the Massif des Aspres (southern France). *Landscape Ecology* 11 (4): 215-224.
- Vega, J.A., Fernández, C., Pérez-Gorostiaga, P., Fonturbel, T. 2008. The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain). *Forest Ecology and Management* 256: 1596–1603.
- Vega-Hidalgo, J.A. 2003. Regeneración del género *Pinus* tras incendios. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 15: 59-68

9 ANEXOS

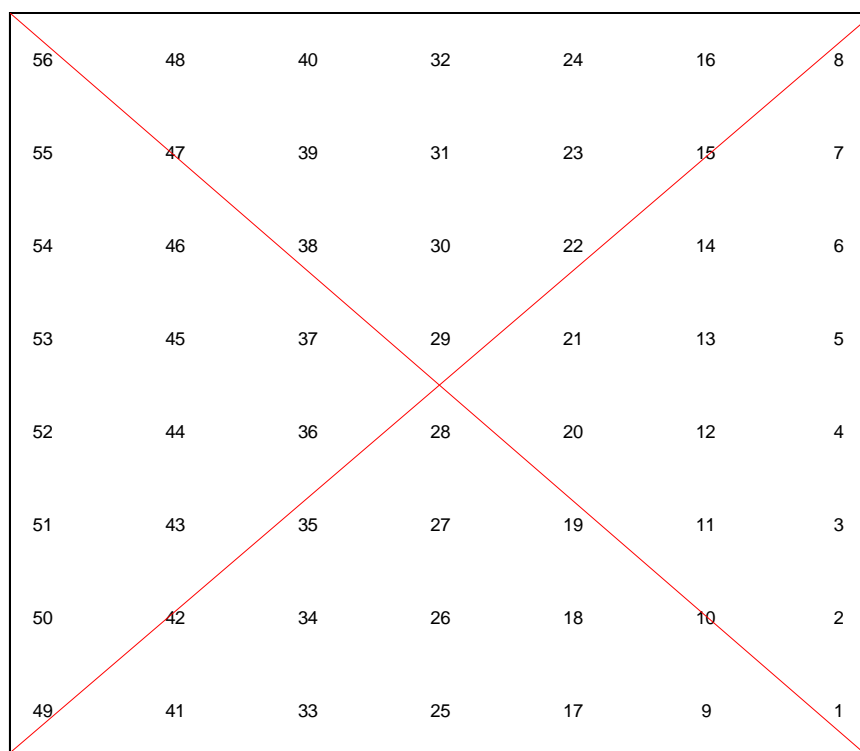


Figura 21. Distribución y numeración general de los pies individuales de las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento T o A.

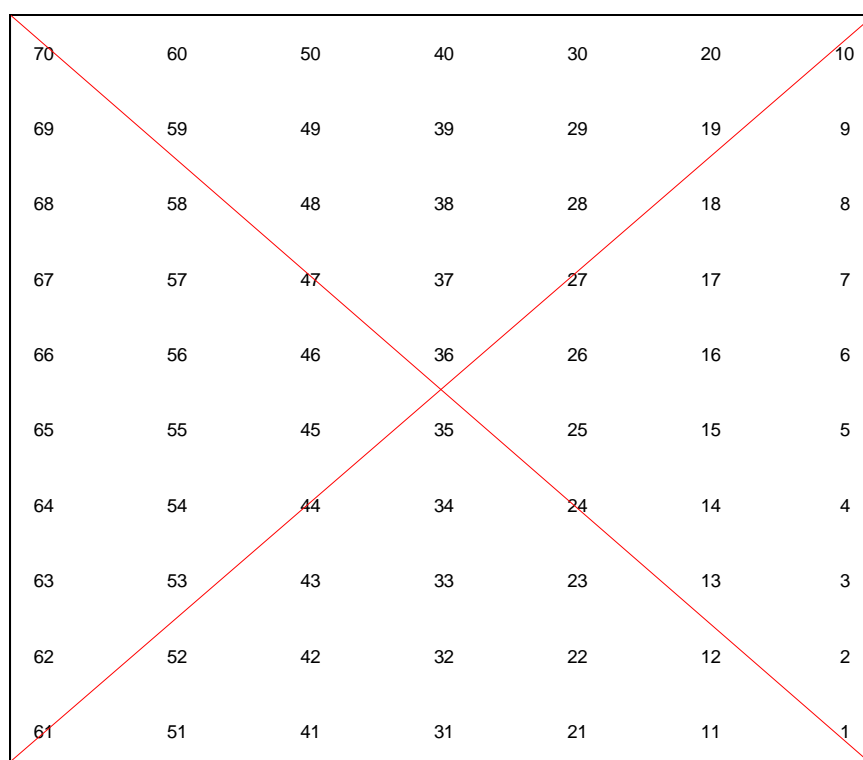


Figura 22. Distribución y numeración general de los pies individuales de las parcelas donde se ha aplicado un tratamiento B.

Tabla 7. Modelos Lineales Mixtos utilizados para el tratamiento estadístico de las variables dasométricas.

Variables	Fórmulas
Altura total	$\text{Imer}(H_{\text{total}} \sim \text{Año} * \text{Tratamiento} + (1 \text{Parcela}))$
Altura de inicio de copa	$\text{Imer}(H_{\text{inicio_copa}} \sim \text{Año} + (1 \text{Parcela}))$
Altura de inicio de yemas	$\text{Imer}(H_{\text{inicio_yemas}} \sim \text{Año} + \text{Tratamiento} + (1 \text{Árbol}))$
Diámetro de inicio de copa	$\text{Imer}(D_{\text{inicio_copa}} \sim \text{Año} * \text{Tratamiento} + (1 \text{Árbol}))$
Diámetro de base	$\text{Imer}(D_{\text{base}} \sim \text{Año} * \text{Tratamiento} + (1 \text{Árbol}))$
Diámetro a 50 cm	$\text{Imer}(D_{50} \sim \text{Año} * \text{Tratamiento} + (1 \text{Árbol}))$
Diámetro a 100 cm	$\text{Imer}(D_{100} \sim \text{Año} * \text{Tratamiento} + (1 \text{Parcela}))$
Diámetro a 130 cm	$\text{Imer}(D_{130} \sim \text{Año} + (1 \text{Árbol}))$
Diámetro de copa	$\text{Imer}(D_{\text{m_copa}} \sim \text{Año} * \text{Tratamiento} + (1 \text{Árbol}))$
Espesor de corteza en la base	$\text{Imer}(E_{\text{base}} \sim \text{Tratamiento} + (1 \text{Árbol}))$ $\text{Imer}(E_{\text{base}} \sim \text{Tratamiento} + (1 \text{Parcela}))$
Espesor de corteza a 130 cm	$\text{Imer}(E_{130} \sim \text{Tratamiento} + (1 \text{Árbol}))$ $\text{Imer}(E_{130} \sim \text{Tratamiento} + (1 \text{Parcela}))$

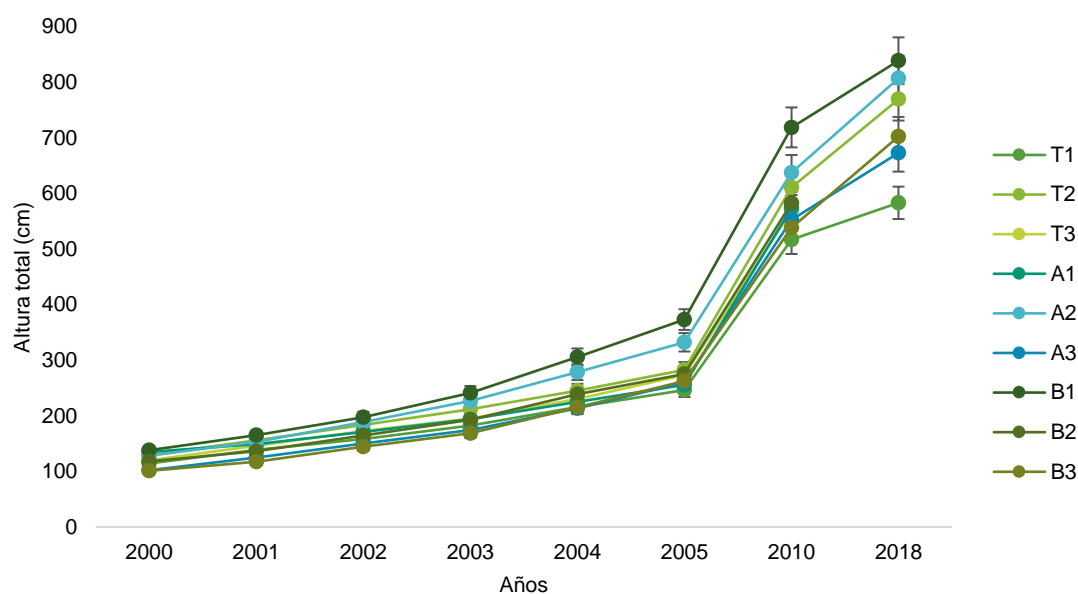


Figura 23. Evolución de la altura del árbol entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).

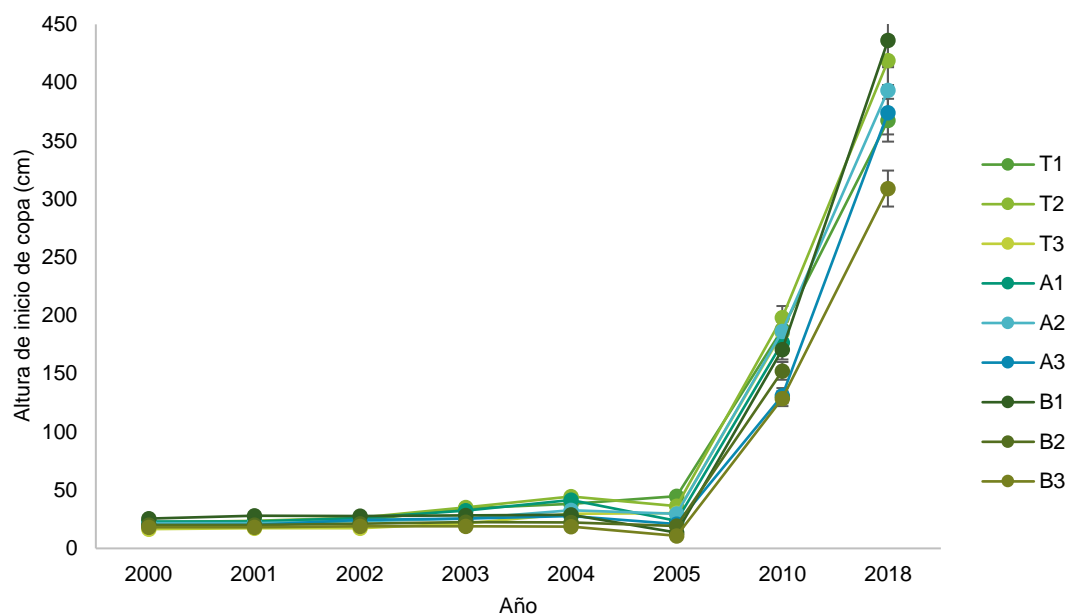


Figura 24. Evolución de la altura de inicio de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).

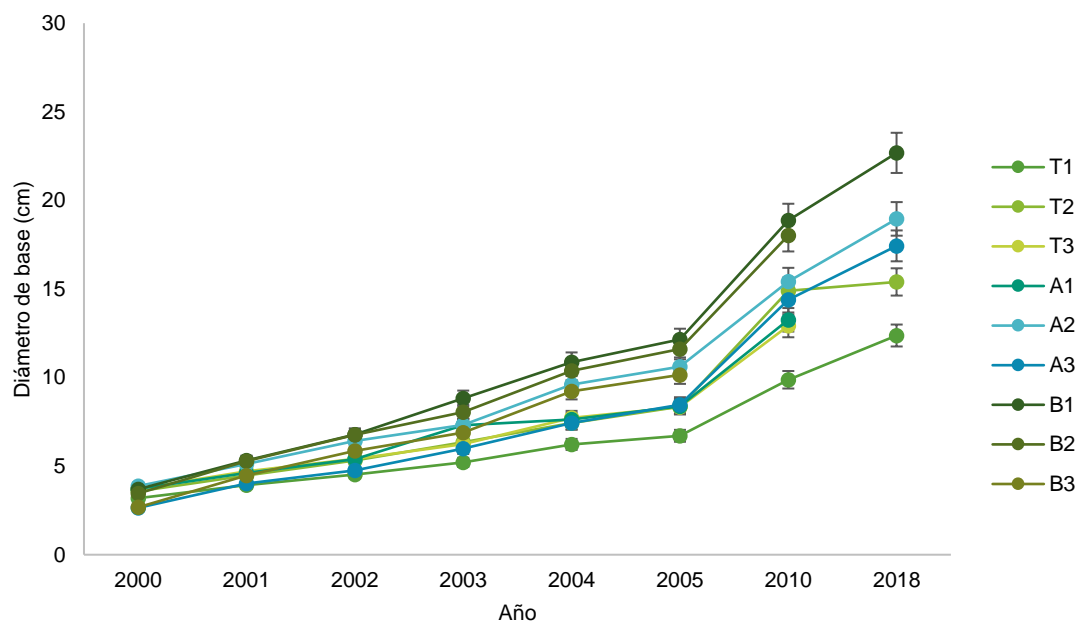


Figura 25. Evolución del diámetro de base entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).

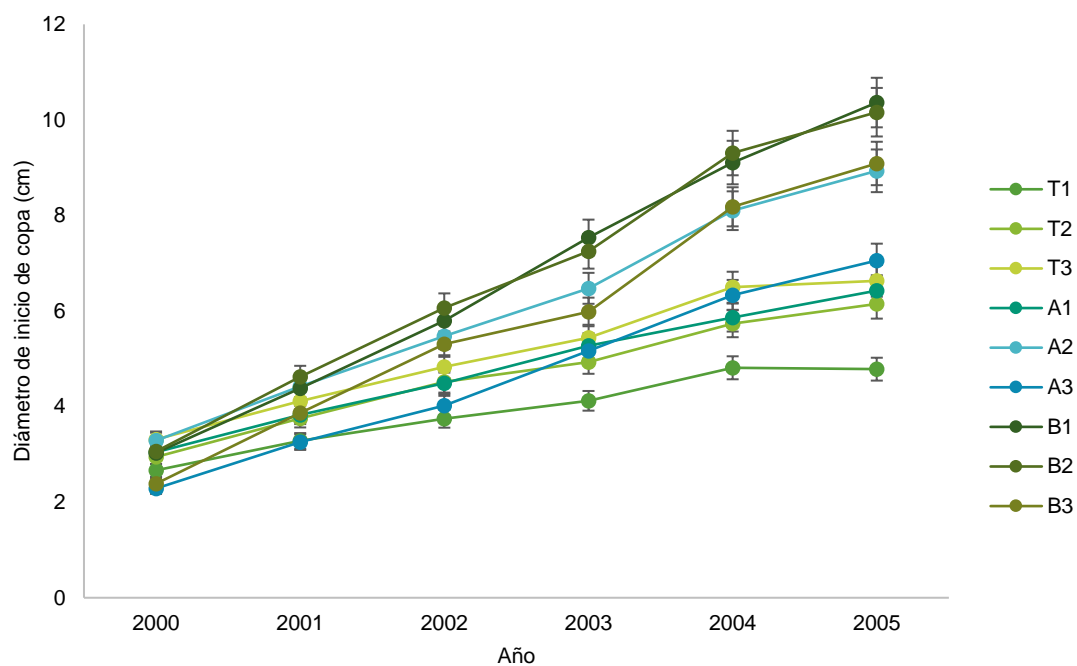


Figura 26. Evolución del diámetro de inicio de copa entre los años 2000 y 2005 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).

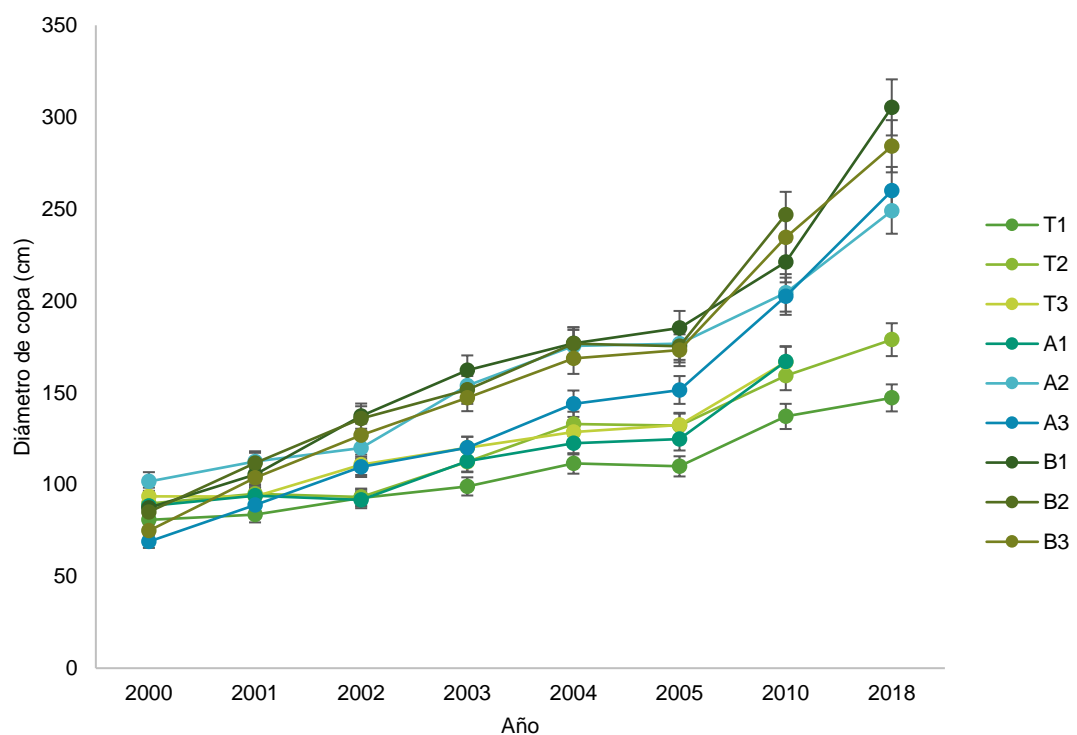


Figura 27. Evolución del diámetro de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).

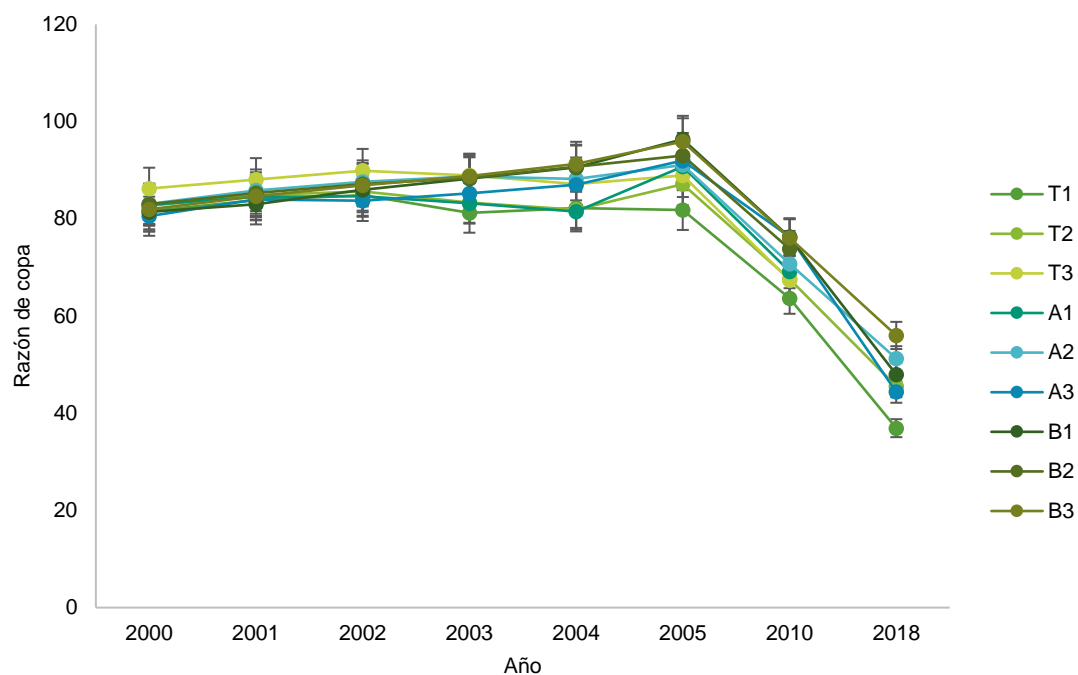


Figura 28. Evolución del índice de razón de copa entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).

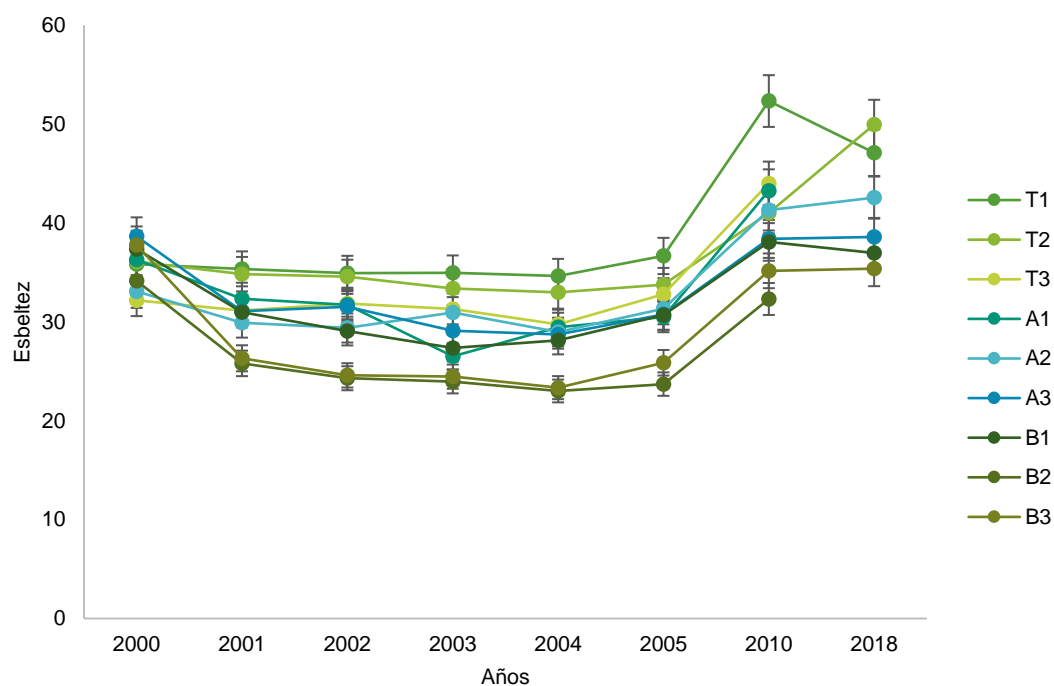


Figura 29. Evolución del índice de esbeltez entre los años 2000 y 2018 para los tres tratamientos estudiados T (Testigo), A (Clareo intenso), B (Clareo muy intenso) en cada parcela (T1, T2, T3, A1, A2, A3, B1, B2, B3).

Tabla 8. Promedio de piñas en cada parcela (en cada réplica de los tratamientos aplicados). La primera columna hace referencia a la ubicación de las piñas en el fuste (F) o en las ramas (R). Datos del año 2018.

F/R	Año	A2		A3		B1		B3		T1		T2	
		Media	Máx	Media	Máx	Media	Máx	Media	Máx	Media	Máx	Media	Máx
F	2017	0.0179	1	0.0000	0	0.0143	1	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
F	2016	0.2500	2	0.2500	2	0.5714	3	0.3286	16	0.0893	2	0.1071	2
F	2015	0.2143	2	0.3393	2	0.5857	2	0.3286	2	0.1071	1	0.1071	1
F	2014	0.0714	2	0.1786	2	0.3000	2	0.1429	2	0.1071	2	0.0536	1
F	2013	0.0893	2	0.1250	2	0.3429	2	0.1286	2	0.0179	1	0.0357	1
F	2012	0.0179	1	0.0893	1	0.2286	2	0.0714	2	0.0179	1	0.0000	0
F	2011	0.0357	2	0.0714	3	0.1000	2	0.0429	3	0.0000	0	0.0000	0
F	2010	0.0000	0	0.0000	0	0.0143	1	0.0000	0	0.0179	1	0.0000	0
F	2009	0.0000	0	0.0000	0	0.0429	1	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
F	2008	0.0000	0	0.0000	0	0.0286	1	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
R	2016	0.0000	0	0.0000	0	0.1143	6	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
R	2015	0.0000	0	0.0000	0	0.3429	10	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
R	2014	0.0000	0	0.0000	0	0.0286	1	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
R	2013	0.0000	0	0.0179	1	0.0857	6	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
R	2012	0.0000	0	0.0179	1	0.0000	0	0.0286	1	0.0000	0	0.0000	0
R	2011	0.0000	0	0.0179	1	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
R	2009	0.0000	0	0.0179	1	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
R	2007	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0

Tabla 9. Promedio y máximo de piñas según el tratamiento aplicado (T, A, B). Datos del año 2018.

Fuste/ramas	Año	A		B		T	
		Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Fuste	2017	0.008928571	1	0.007142857	1	0.000000000	0
Fuste	2016	0.250000000	2	0.450000000	16	0.09821429	2
Fuste	2015	0.2767857	2	0.4571429	2	0.1071429	1
Fuste	2014	0.125000000	2	0.22142857	2	0.08035714	2
Fuste	2013	0.10714286	2	0.23571429	2	0.02678571	1
Fuste	2012	0.053571429	1	0.150000000	2	0.008928571	1
Fuste	2011	0.05357143	3	0.07142857	3	0.000000000	0
Fuste	2010	0.000000000	0	0.007142857	1	0.008928571	1
Fuste	2009	0.000000000	0	0.02142857	1	0.000000000	0
Fuste	2008	0.000000000	0	0.01428571	1	0.000000000	0
Ramas	2016	0.000000000	0	0.05714286	6	0.000000000	0
Ramas	2015	0.000000000	0	0.1714286	10	0.000000000	0
Ramas	2014	0.000000000	0	0.01428571	1	0.000000000	0
Ramas	2013	0.008928571	1	0.042857143	6	0.000000000	0
Ramas	2012	0.008928571	1	0.014285714	1	0.000000000	0
Ramas	2011	0.008928571	1	0.000000000	0	0.000000000	0
Ramas	2009	0.008928571	1	0.000000000	0	0.000000000	0
Ramas	2007	0.000000000	0	0.000000000	0	0.000000000	0

Tabla 10. Test de normalidad de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de los residuos.

Variables	W	p-value
Altura total	0.88328	< 2.2e-16
Altura de inicio de copa	0.61455	< 2.2e-16
Altura de inicio de yemas	-	-
Diámetro de inicio de copa	0.95015	< 2.2e-16
Diámetro de base	0.77853	< 2.2e-16
Diámetro a 50 cm	0.91079	< 2.2e-16
Diámetro a 100 cm	0.89011	< 2.2e-16
Diámetro a 130 cm	0.040936	< 2.2e-16
Diámetro de copa	0.91936	< 2.2e-16
Espesor de corteza en la base	0.13769	< 2.2e-16
Espesor de corteza a 130 cm	0.51482	< 2.2e-16

Tabla 11. Test de Levene de homogeneidad de varianza.

Variables	Df	F value	Pr(>F)
Altura total	8 (3988)	8.0895	6.805e-11 ***
Altura de inicio de copa	8 (4004)	15.817	< 2.2e-16 ***
Diámetro de inicio de copa	8 (3128)	27.813	< 2.2e-16 ***
Diámetro de base	8 (3985)	14.975	< 2.2e-16 ***
Diámetro a 50 cm	8 (3099)	23.914	< 2.2e-16 ***
Diámetro a 100 cm	8 (2301)	15.263	< 2.2e-16 ***
Diámetro a 130 cm	8 (829)	1.228	0.2792
Diámetro de copa	8 (3972)	31.409	< 2.2e-16 ***
Espesor de corteza en la base	2 (163)	1.9127	0.151
Espesor de corteza a 130 cm	2 (162)	4.7779	0.009635 **